

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم آلية وكهرونتقني
Département Automatique et Électrotechnique



Mémoire de Master

Filière Électrotechnique
Spécialité Machine Electrique

présenté par

BRAHMI Abdelmalek

&

TALBI ALI

Etude et Modélisation d'une Génératrice Asynchrone à Cage dans un Système Éolien

Proposé par : Dr.KOUCHIH

Année Universitaire 2020-2021

Remerciement

En premier lieu, nous remercions notre Dieu pour sa clémence et qui nous a donné le courage, la volonté et surtout la santé pour réaliser ce modeste travail.

C'est un plaisir autant qu'un devoir d'exprimer nos gratitudee à toutes les personnes ayant contribué, chacune à sa manière, pour le bon déroulement de notre projet de fin d'études.

Nos vifs remerciements à notre promoteur Monsieur KOUCHIH Djilali, pour son accueil, son aide et sa confiance.

Nos sincères gratitudee à Monsieur HACHLAF Redouane, pour la qualité de son enseignement, ses conseils et son intérêt incontestable qu'il porte à tous les étudiants.

Merci à nos familles, Il nous est impossible d'exprimer en quelques mots tout ce que nous devons, pour leurs encouragements et leur appui moral qui nous ont permis de mener à bon terme ce travail.

Enfin, nos remerciements vont à tous ceux qui nous ont soutenus ou qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à l'élaboration de ce travail.

Brahmi Abdelmalek

Talbi Ali

ملخص: اغلب المولدات التي تستخدمها في توربينات الرياح هي مولدات غير متزامنة ثلاثية الاطوار. حيث لهذه المولدات العديد من المزايا تتمثل في القوة والتكلفة بالإضافة الى ان عيبها هو استهلاك الطاقة التفاعلية التي توفرها الشبكة او يعوضها مخزون المكثفة و من ثم امكانية التشغيل المستقل. نقدم في دراستنا نتائج المحاكات لالة قفص السنجاب الغير دوري و هي الاكثر استخداما في وحدات توليد الطاقة بالرياح و هي بدورها تعمل بسرعة ثابتة مع مراعاة الافتراضات المبسطة وضاهرة التشبع .

Résumé : La plupart des génératrices utilisées par les éoliennes sont des génératrices asynchrones triphasées. Celles-ci ont plusieurs avantages, elles sont robustes, leur coût est faible. Par ailleurs, leur inconvénient c'est la consommation de l'énergie réactive fournie soit par le réseau, soit compensée par une batterie de condensateurs d'où la possibilité de fonctionnement autonome. Dans notre étude nous présentons les résultats de simulation de la machine asynchrone à cage d'écureuil, la plus utilisée dans les éoliennes fonctionnant à une vitesse constante, en tenant compte des hypothèses simplificatrices et de phénomène de la saturation.

Abstract : Most of the generators used by wind turbines are three-phase asynchronous generators. These have several advantages, they are robust, and their cost is low. Otherwise, their disadvantages are the consumption of reactive energy supplied either by the network or offset by a capacitor bank, hence the possibility of autonomous operation. In our study we present the experimental results of the asynchronous squirrel cage machine, the most used in wind turbines operating at a constant speed, taking into account the simplifying assumptions for the mathematical modeling of the machine, as well as the simulation of the operation of the wind turbine.

Listes des acronymes et abréviations

V1 : La vitesse de vent non perturbé avant de l'éolienne.

V2 : La vitesse de vent après passage à travers le rotor

ρ : Densité d'air.

S : La surface des pales.

M : La moitié entre V1 et V2.

Pm : Puissance mécanique.

Pmt : Puissance mécanique de turbine.

Cp : coefficient de puissance.

Vne : Vitesse nominale.

Ω_{opt} : La vitesse de rotation optimale.

F : fréquence du réseau en hertz (Hz).

W : pulsation électrique du champ tournant en (rad/s).

Ns : vitesse de synchronisme en (tr/min).

Ω_s : Vitesse mécanique synchrone de rotation du champ tournant en (rad/s).

N : Vitesse de rotation de rotor en (tr/min).

Ω : Vitesse de rotation de rotor en (rad/s).

P : nombre de pair de pole.

Rr : Résistance rotorique.

Rs : Résistance statorique.

g : Glissement.

Cem : Couple électromagnétique.

Vabc_r , Vabc_s: Les tensions entre phase rotorique et statorique

iabc_r , iabc_s : Les courants entre phase rotorique et statorique.

ϕabc_s , ϕabc_r : Flux statorique et rotorique.

L_s, L_r : Inductances propres statorique et rotorique.

L_m, L_{rs} : Inductance mutuelles.

v_{as} , v_{bs} , v_{cs} : Les tensions statorique.

i_{as} , i_{bs} , i_{cs} : Les courants statorique.

i_{ar} , i_{br} , i_{cr} : Les courants rotorique.

ϕ_{as} ϕ_{bs} ϕ_{cs} : Les flux statorique.

ϕ_{ar} ϕ_{br} ϕ_{cr} : Les flux rotorique.

ϕ_m : flux magnétique.

[P(θ)] : Matrice de Park.

J : moment d'inertie.

C_m : couple moteur.

ω_r : Pulsation rotorique.

P_r, P_s : puissances actifs.

Q_r , Q_s : Puissances réactifs.

C : Capacité.

Z : Impédance.

Z_{ch} : Impédance de charge.

Z_{tot} : Impédance totale.

Z_{res} : Impédance de réseau.

$L_{\sigma s}, L_{\sigma r}$: Les Inductances de fuite au stator et au rotor.

FEM : Force électromotrice.

I_m : courant de magnétisation.

Remerciements

Listes des acronymes et abréviations

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre 1 : Généralité

1.1. Introduction 4

1.2. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne 4

1.2.1 Définition de l'énergie éolienne 4

1.2.2. Principaux composants d'une éolienne 5

1.3. Généralités sur les différents types d'éoliennes 7

1.3.1. Eoliennes à axe vertical 7

1.3.2. Eoliennes à axe horizontal 9

1.4. Energie cinétique du vent 10

1.4.1. Loi de Betz 10

1.5. Stratégies de fonctionnement d'une éolienne 14

1.5.1. Bilan des forces sur une pale : 14

1.5.2. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne : 15

1.5.2.1 Système à décrochage aérodynamique "stall" : 15

1.5.2.2 Système d'orientation des pales "pitch" : 16

1.5.3. Production optimale d'énergie : 16

1.6. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne 17

1.7. Etude et fonctionnement de la Machine Asynchrone 18

1.7.1. Introduction : 18

1.7.2. Classification de machines électriques tournantes : 19

1.7.3. Constitution de la machine asynchrone : 20

1.7.3.1. Le stator : 21

1.7.3.2. Rotor (Induit) : 21

1.7.3.2.1. Rotor à cage :	21
1.7.3.2.2. Rotor bobiné :	23
1.7.3.3. Les palies :	23
1.7.3.4. L'entrefer :	23
1.7.3.5. Les organes mécaniques :	24
1.7.5. Avantages et inconvénients de la machine asynchrone :	24
1.8 Système utilisant les machines asynchrones à cage (MAS)	25
1.9. Conclusion	26
Chapitre 2 : Modélisation d'une Génératrice Asynchrone à Cage en régime linéaire	
2.1. Introduction	27
2.2. La machine à induction	28
2.2.1. Cas d'un fonctionnement hypo-synchrone	Erreur ! Signet non défini.
2.2.2. Cas d'un fonctionnement Hyper-synchrone	Erreur ! Signet non défini.
2.3. Hypothèses	31
2.4. Génératrice asynchrone à cage :	31
2.5. Modèle real <i>abc</i> de la machine asynchrone triphasée	32
2.5.1. Equations électriques réelles de la génératrice :	33
2.5.2. Equation des flux magnétiques	34
2.6. Modèle de la GA à cage dans le repère de Park :	35
2.6.1 Modèle de Park :	37
2.7. Equations de Puissance et de Couple :	40
2.8. Puissances active et réactive	41
2.9. Modèle d'état de Park :	42
2.10. La machine Asynchrone auto-excité :	42
3.6.1. Introduction :	42
2.10.2 Modélisation de l'auto-amorçage :	42
2.10.3. Auto-excitation de la génératrice à Vide	44
2.10.4. Auto-excitation de la génératrice en charge	48
2.10.5. Comportement de la génératrice lors de la connexion au réseau	50
2.10.6. Détermination de la valeur des capacités d'auto-amorçage	52
2.10.7. Modélisation de la charge :	55

2.10.7.1. Transformation étoile-triangle :	55
2.10.7.2. Equations de la charge :.....	56
2.11. résultats de Simulation :.....	58
Chapitre 3 : Modélisation de la Génératrice Asynchrone en régime de saturée	
3.1. Introduction	63
3.2. Fonctionnement à vide :	63
3.3. Modèle diphasé de la machine asynchrone saturée	64
3.3.1 Equations de la génératrice dans le repère $\alpha.\beta$	65
3.3.2. Représentation schématique des flux :	66
3.4. Détermination des inductances saturables équivalentes	71
3.5. Mise sous forme d'état du modelé biphasé.....	74
7. Conclusion :	78
Conclusion générale	79
Annexes	
Bibliographie	

Liste des figures

Chapitre 1 : Généralité

Figure 1.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	5
Figure 2.1 : Détail d'un système conduit de production d'électricité de turbine de vent.....	7
Figure 3.1: Aérogénérateur à axe horizontale.....	7
Figure 4 .1 : éolienne de Savonius.....	8
Figure 5.1: Éolienne de Darrieus.....	9
Figure 6.1: Photographie d'une éolienne à axe horizontal et d'un moulin à vent.....	10
Figure 7.1 : Tube de courant autour d'une éolienne.....	11
Figure 8.1: Coefficient de puissance.....	12
Figure 9.1: Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné.....	13
Figure 10.1 : Bilan des forces sur une pale	14
Figure 11.1: Flux d'air sur un profil de pale " stall ".....	15
Figure 12.1 : Variation de l'angle de calage d'une pale	16
Figure 13.1: Influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple.....	16
Figure 14.1. : Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable	17
Figure 15.1: Classifications de machines électriques alternatives	19
Figure 16.1 : Schéma désignant les éléments constituant une machine asynchrone.....	20
Figure 17.1: schéma présente l'enroulement du stator.....	21
Figure 18.1: Rotor a cage d'un moteur asynchrone triphasé.....	22
Figure 19.1: Rotor bobiné d'un moteur asynchrone triphasé.....	23
Figure 20.1 : Vue éclatée d'un moteur asynchrone triphasé à cage.....	24
Figure 21.1: Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.....	25

Chapitre 2 : Modélisation d'une Génératrice Asynchrone à Cage en régime linéaire

Figure 2.1 : Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse fixe.....	28
Figure 2.2: Rotor à cage d'écureuil sous le champ magnétique de rotation.....	28
Figure 2.3 : glissement d'une génératrice asynchrone.....	30
Figure 2.4: Le circuit équivalent d'une phase de la machine à induction rapporté au stator.....	31
Figure 2.5: Glissement d'une génératrice asynchrone.....	31
Figure 2.6 Schéma représentatif de la GAS auto-amorcée.....	33

Figure 2.7: Disposition des enroulements de la machine asynchrone triphasée.....	33
Figure 2.8. : Repères de référence : statorique et rotorique.....	37
Figure 2.9. : Principe de transformation de Park.....	37
Figure 2.10: Représentation des enroulements fictifs d'axes ' α ' et ' β '.....	40
Figure 2.11 : Circuits équivalents dans le repère référentiel $\alpha\beta$ pour une machine à induction triphasée et symétrique.....	41
Figure 2.11 – Machine asynchrone auto – excitée avec une batterie de condensateurs.....	45
Figure 2.13 : Modèle diphasé de la génératrice auto-amorcée alimentant une charge.....	45
Figure 2.14 : schéma de principe.....	46
Figure 2.15 : Schéma équivalent d'une génératrice asynchrone auto-excitée.....	47
Figure 2.16 : Schéma équivalent d'une génératrice asynchrone auto-excitée.....	47
Figure 2.17 : Détermination du domaine d'amorçage.....	48
Figure 2.18 : Schéma de principe.....	50
Figure 2.19 : Schéma équivalent de la génératrice avec une charge résistive.....	50
Figure 2.20 : Schéma équivalent simplifié d'une phase de la machine asynchrone ramené au Stator.....	54
Figure 2.21 : Transformation du schéma équivalent.....	54
Figure 2.22 : Caractéristique(ωs).....	55
Figure 2.23 : Caractéristique $G(\omega s)$	56
Figure 2.24 : Transformation étoile-triangle de la charge et des condensateurs d'amorçage.....	57
Figure 2.25 : Courants de ligne et de phase et tensions composées.....	58
Figure 2.26 : Tension d'auto-amorçage à vide.....	60
Figure 2.27 : Courant statorique induit.....	61
Figure 2.28 : le couple à vide ou régime linéaire	62
Figure 2.29 : les flux rotorique à vide ou régime linéaire	63
Figure 2.30 : les flux de Park à vide ou régime linéaire	63

Chapitre 3 : Modélisation de la Génératrice Asynchrone en régime de saturée	
Figure3.1 : Caractéristique de fonctionnement à vide.....	64
Figure .3.2 : Schéma équivalent de la GAS dans le référentiel de Park.....	65
Figure 3.3 Représentation schématique des flux selon les axes α	66
Figure 3.4 : Schéma équivalent des flux salon Faxe α	67
Figure 3.5 : Décomposition de flux selon les axes $\alpha\beta$.....	68
Figure 3.6: Caractéristique de magnétisation de la machin.....	71
Figure 3.7 : Approximation mathématique de la caractéristique de magnétisation.....	74
Figure 3.8 : Tension d’auto-amorçage à vide dans régime saturation.....	75
Figure 3.09 : Courant d’auto-amorçage à vide dans régime saturation.....	75
Figure 3.10 : variation d’inductance magnétique en fonction courant magnétique.....	76
Figure3.11 : Simulation de l’évolution de l’inductance mutuelle.....	76
Figure 3.12 : le flux statorique dans régime saturation.....	77
Figure 3.13 : le couple statorique dans régime saturation.....	77

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Avantages et inconvénients de la machine asynchrone.....	24
---	-----------

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

La production d'énergie électrique dans le monde produit diverses formes de pollution. Par conséquent, les centrales thermiques (charbon, pétrole) sont responsables des émissions Atmosphère associée à la combustion de combustibles fossiles. En revanche, les centrales L'énergie nucléaire s'est renforcée après la crise pétrolière, mais n'a pas encore Impact négatif sur la qualité de l'air. En revanche, ils génèrent des déchets Conduire à de grandes quantités de stockage, de traitement ou transport.

Aujourd'hui, la crainte de n'utiliser qu'une seule énergie avec tous ses risques, la prise de conscience des risques pour l'environnement, l'engouement pour les énergies dites renouvelables et l'ouverture du marché de la production d'énergie électrique sont autant de facteurs qui redonnent une place importante à ces énergies (hydraulique, éolienne, solaire, biomasse, ...) dans la production de l'électricité.

Dans ce cadre, l'exploitation de l'énergie éolienne pour la génération de l'énergie électrique connaît un grand essor. L'aspect le plus visible de cette évolution est, sans conteste, celui de l'utilisation des grandes centrales de production de masse, reliées au réseau, et dont la puissance unitaire ne cesse de croître. Un autre aspect, moins visible mais qui a tout autant d'importance, est celui des petites unités de production. En effet, ces dernières sont de plus en plus prisées pour des fonctionnements autonomes pour assurer l'alimentation de sites isolés et/ou autonomes ou encore, avec l'apparition de nouvelles architectures à axe vertical, pour être exploitées dans un environnement urbain.

Dans le cas d'une centrale autonome, différents moteurs peut être utilisé comme générateur pour fournir une conversion électromécanique. Cependant, pour des raisons de fiabilité, de robustesse et de prix de revient, la machine à cage asynchrone Les écureuils sont encore répandus.

Quelle que soit la machine utilisée, le fonctionnement en générateur autonome se distingue par des contraintes et des spécificités autres que celles rencontrées dans le cas des grandes centrales éoliennes. En effet, la préoccupation principale de ce fonctionnement est le maintien de l'amplitude et la fréquence de la tension générée à des valeurs constantes quelles que soient la vitesse de rotation de l'éolienne et la puissance demandée dans une certaine plage. Ceci passe alors par la mise en œuvre d'une commande du système éolien.

Application du générateur asynchrone à cage dans la production d'énergie éolienne

La petite unité peut être soit un site isolé, soit un micro-réseau indépendant. Dans un Pour les applications d'isolement, des structures de faible puissance (inférieures à 10 kW) peuvent être utilisées sans contrôle. Dans ce cas, utilisez une machine à cage asynchrone En tant que générateur de capacité monophasée connecté à la charge. Dans le cas d'un micro réseau autonome, la machine utilisée à La puissance est inférieure à 100 kilowatts et la charge est généralement triphasée.

Notre travail consiste à étudier et évaluer les performances de centrales éoliennes, en utilisant des machines asynchrones à cage d'écureuil.

Dans le premier chapitre de ce mémoire, nous présentons un état de l'art des solutions utilisées pour la conversion de l'énergie éolienne. Après l'introduction de quelques notions théoriques sur l'énergie éolienne, nous décrivons diverses architectures adoptées dans les systèmes éoliens connectés au réseau électrique et dans les systèmes éoliens isolés et consacré au fonctionnement et la construction de la machine asynchrone.

Le deuxième chapitre présente une étude sur la modélisation de la génératrice asynchrone en régime dynamique, linéaire à travers les équations électriques, de flux et de couple à l'aide de la transformation de Park et certaines hypothèses et le principe de fonctionnement de la machine asynchrone, On est consacré à une étude des performances et les limites de l'utilisation d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil auto-excitée par une batterie de capacités. Cela nous amène, à l'aide d'un modèle, à procéder aux calculs des capacités minimales à vide et en charge que nous avons utilisée programme mathématique et simulation de MATLAB.

Le troisième chapitre Nous avons présenté la procédure de prise en compte de l'effet de la saturation magnétique du circuit du flux principal de la machine en régime dynamique. Dans la partie simulation et résultats expérimentaux" (plus bas) nous allons voir que les résultats obtenus à partir du modèle saturé de la machine, sont concordants avec ceux issus de l'expérimentation. et affiche les graphes de la simulation au aide de Matlab

1.1. Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à Pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les Structure des capteurs sont de plus en plus performantes. Externat caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des Machines are synchrones and asynchrones. Command stratégie machine et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettent de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

1.2. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne

1.2.1 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (**Figure 1.1**).

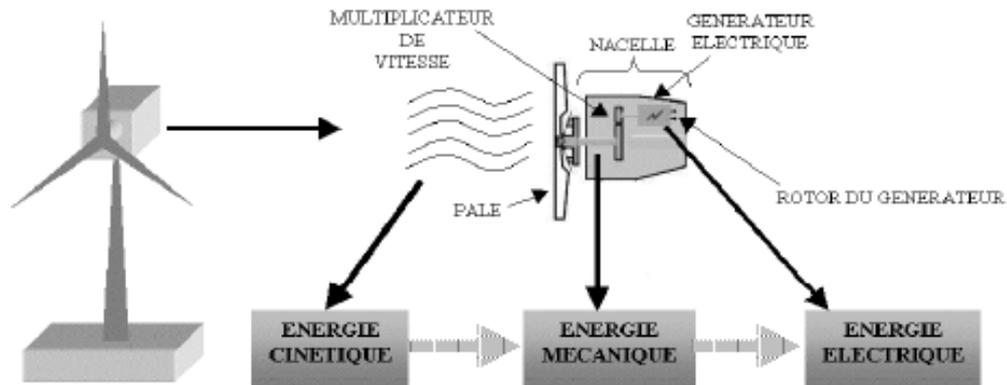


Figure 1.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

L'énergie éolienne est une source d'énergie « renouvelable » non dégradée, géographiquement dispersée et surtout liée aux saisons. (L'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une source d'énergie qui ne génère pas d'émissions atmosphériques ni de déchets radioactivité. Cependant, elle est aléatoire dans le temps et sa capture est encore assez compliquée, nécessitant l'utilisation de grands mâts et pales (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les turbulences.

Les matériaux nécessaires à la fabrication de divers composants (notamment les nacelles de mât, les pales et les réducteurs) doivent être technologiquement avancés et donc coûteux. L'énergie éolienne est l'une des nouvelles façons de produire de l'électricité. La décentralisation offre une alternative viable à l'énergie nucléaire, mais elle ne prétend pas la remplacer (la quantité d'énergie produite est beaucoup plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

1.2.2. Principaux composants d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux:

Le mât, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un

compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90m, mât de 80 m de hauteur).

La nacelle rassemble tous les éléments mécaniques pour que le rotor éolien puisse être relié à la nacelle Générateur : arbre lent et arbre rapide, roulement, multiplicateur. Freins à disque, Contrairement à un frein pneumatique, il peut arrêter le système en cas de surcharge. Ces Les générateurs sont généralement des machines et des systèmes synchrones ou asynchrones Orientation hydraulique ou électrique des pales (frein pneumatique) et de la nacelle (La surface balayée par l'éolienne doit être maintenue perpendiculaire à la direction vent). De plus, il existe des systèmes refroidis à l'air ou à l'eau, Anémomètre et système de gestion électronique de l'éolienne.

Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pal Permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.

Les rotors à vitesse variable sont généralement moins chers parce que le dispositif d'orientation Les pales sont simplifiées voire supprimées (Jeumont Industrie utilise des rotors de pas stable). Cependant, l'interface électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou besoin de payer. La principale caractéristique de la lame est sa géométrie Les performances aérodynamiques et ses matériaux de fabrication dépendront de (Actuellement, les matériaux composites tels que la fibre de verre et récemment la fibre de verre Le carbone est largement utilisé en raison de sa légèreté et de sa bonne résistance mécanique).

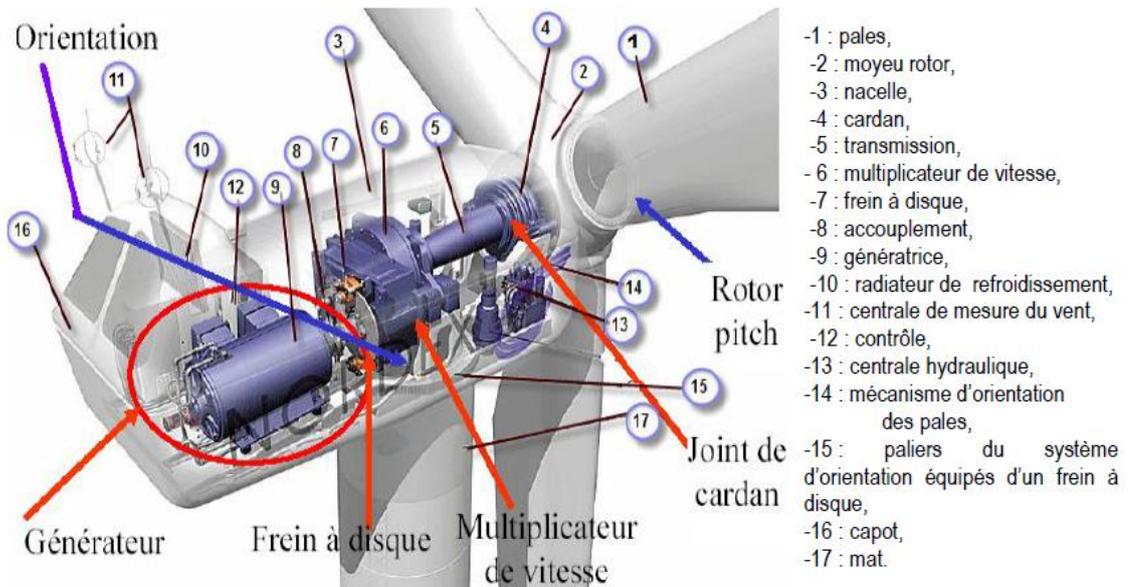


Figure 2.1 : Détail d'un système conduit de production d'électricité de turbine de vent.

1.3. Généralités sur les différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : les éoliennes à axe vertical qui tendent à disparaître, les éoliennes lentes à axe horizontal utilisées surtout pour le pompage et les éoliennes rapides à axe horizontal plus particulièrement utilisées dans la production d'énergie électrique.

1.3.1. Eoliennes à axe vertical

L'éolienne à axe vertical est la première structure développée pour la production d'électricité contredit les moulins à vent traditionnels horizontal. Leur avantage est que les équipements de contrôle et les générateurs sont situés Le sol est donc facilement accessible. De nombreuses variantes ont été testées Dans les années 1920, beaucoup ont échoué, mais deux structures ont atteint Industrialisation :



Figure 3.1: Aérogénérateur à axe horizontale.

Le rotor de Savonius : dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (**Figure 1.4**).

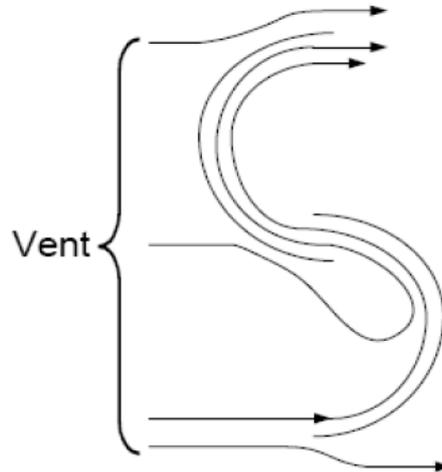


Figure 4 .1 : éolienne de Savonius.

Les éoliennes à variation cyclique : d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus. Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (**Figure 1.5**) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur).

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. En effet la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Elles sont de plus exposées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées.

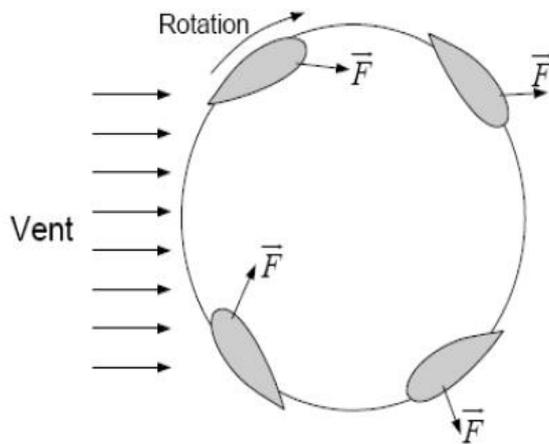


Figure 5.1: Éolienne de Darrieus.

1.3.2. Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères [6]. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal.



Figure 6.1: Photographie d'une éolienne à axe horizontal et d'un moulin à vent.

1.4. Energie cinétique du vent

1.4.1. Loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure 1-3 sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $\frac{V_1+V_2}{2}$ la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:

$$m = \frac{\rho s (V_1+V_2)}{2} \quad (1.1)$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$p_m = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (1.2)$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (1.1):

$$p_m = \frac{\rho s (V_1+V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (1.3)$$

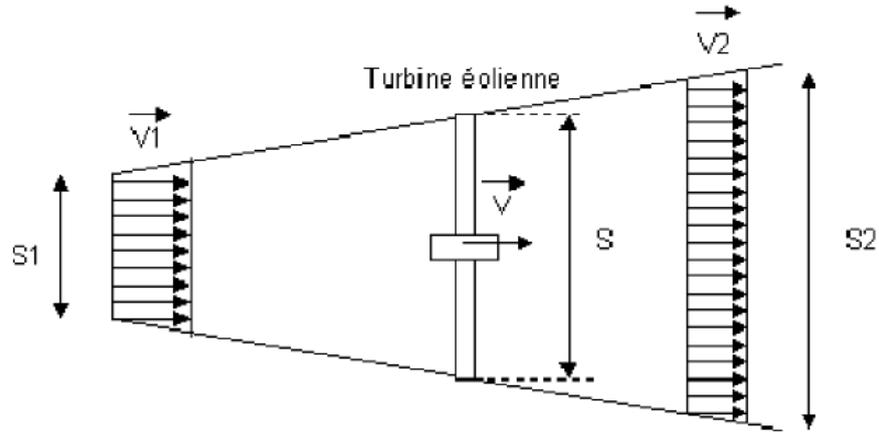


Figure 7.1 : Tube de courant autour d'une éolienne.

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (1.4)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (1.5)$$

Nous représentons les caractéristiques correspondant à l'équation ci-dessus (**Figure 1.8**), nous voulons noter que la valeur maximale du rapport P_m/P_{mt} est aussi appelée le coefficient de puissance C_p est $16/27$ ou $0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance Le maximum extractible à une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est jamais réellement Chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance, exprimé en Une fonction de la vitesse relative λ , qui représente le rapport entre les vitesses en bout de pale Éoliennes et vitesse du vent.

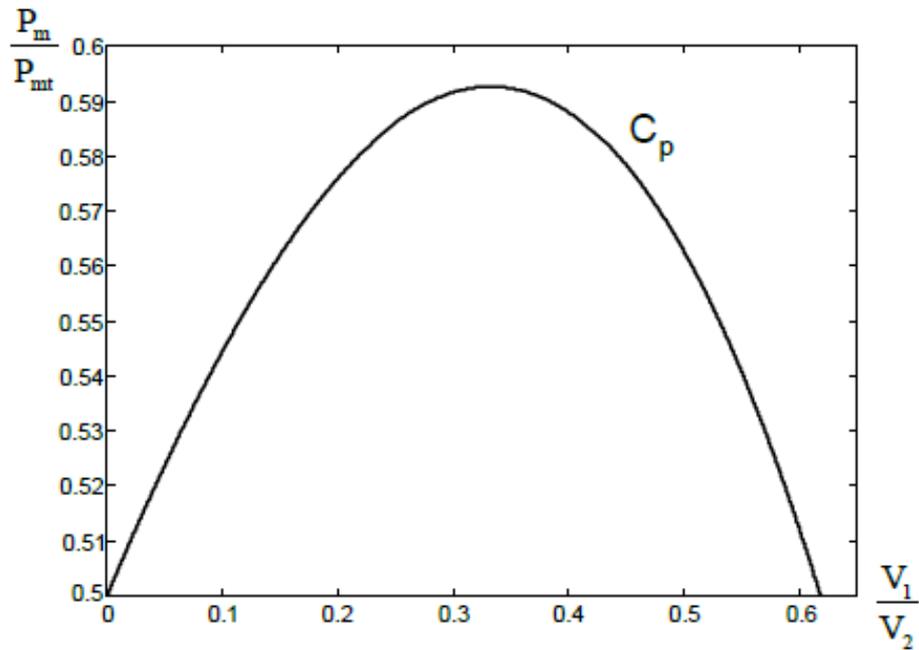


Figure 8.1: Coefficient de puissance.

Les éoliennes lentes ont un grand nombre de pales (entre 20 et 40), Leur inertie importante limite généralement le diamètre à environ 8 m. Leur Le facteur de puissance (**Figure 1.8**) atteint rapidement la valeur maximale pendant le processus de remontée La vitesse, mais elle a également chuté rapidement par la suite. Les éoliennes rapides sont Plus largement, la quasi-totalité est dédiée à la production d'électricité. Ils ont généralement 1 à 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse. Rotation. Longueur de pale jusqu'à 60 m, adaptée à plusieurs éoliennes Mégawatts. Les éoliennes tripales sont les plus courantes car elles représentent un compromis entre les deux Les vibrations causées par la rotation et le coût de l'éolienne. De plus, leurs coefficients La puissance (**Figure 1.8**) atteint une valeur élevée et diminue lentement avec la vitesse augmenter. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s.

1.4.2. Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (1.1), (1.4) et (1.5), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = C_p P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (1.6)$$

$$\text{avec : } \lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1} \quad (1.7)$$

Ω_1 : vitesse de rotation avant multiplicateur ET R: rayon de l'aérogénérateur.

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse K, la puissance mécanique P_{mg} disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_2 R}{K V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (1.8)$$

Avec Ω_2 : vitesse de rotation après multiplicateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent (**Figure 1.9**).

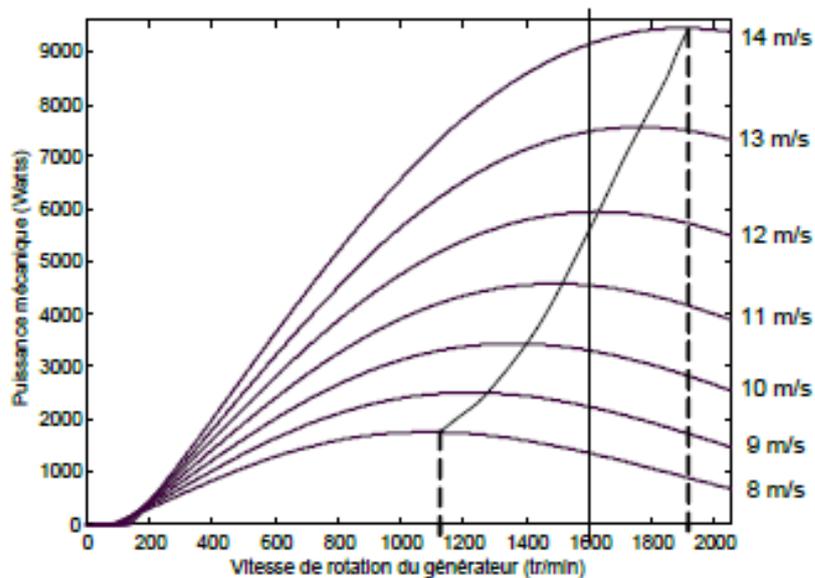


Figure 9.1: Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la Figure 1-6) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple.

1.5. Stratégies de fonctionnement d'une éolienne

1.5.1. Bilan des forces sur une pale :

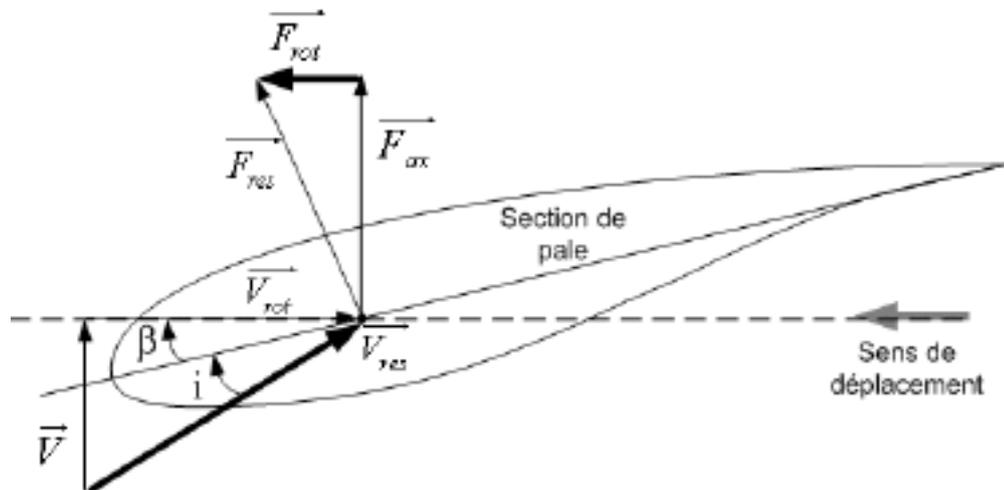


Figure 10.1 : Bilan des forces sur une pale

La (Figure 1.10) montre la coupe longitudinale d'une pale d'éolienne. Cette La vitesse du vent atteignant l'avant de cette pale est représentée par le vecteur v . Le vecteur v_{rot} représente la composante du vent due à la rotation de l'éolienne. Le résultat de ces Les deux vecteurs sont appelés v_{res} . L'action du vent sur les pales crée une force F_{res} Décomposé en poussée axiale, directement compensée par la résistance mécanique La poussée du patin et le sens de rotation F_{rot} produisent effectivement un déplacement. La taille de chaque éolienne est donc déterminée au fur et à mesure que la force atteint sa valeur. Pour une vitesse nominale du vent donnée. Quand la vitesse du vent devient trop élevée ou si le générateur nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite est déterminée par Les éoliennes doivent être supprimées ou limitées à leur valeur nominale.

1.5.2. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne :

1.5.2.1 Système à décrochage aérodynamique "stall" :

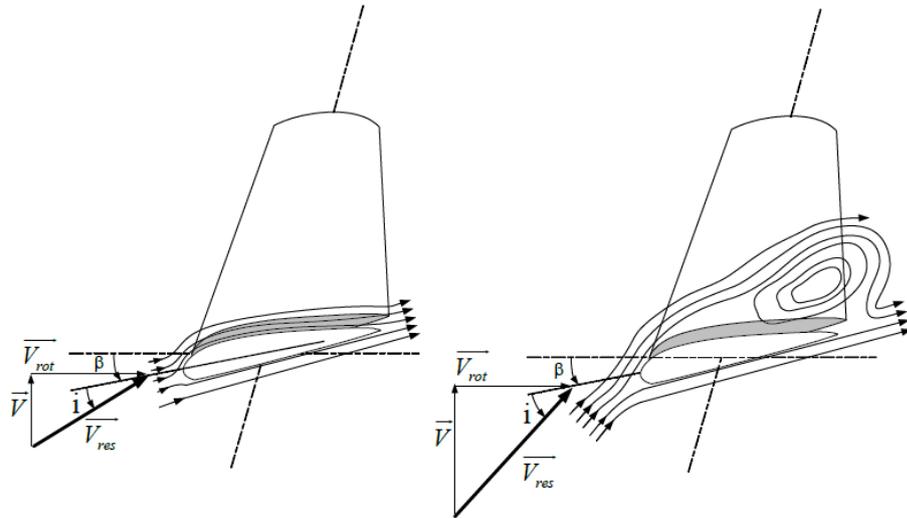


Figure 11.1: Flux d'air sur un profil de pale "stall".

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (**Figure 1.11**) et par conséquent.

Le système est simple et relativement fiable, mais manque de précision car il dépend de la densité de l'air et la rugosité des pales et leur état de propreté. Il peut, Dans certains cas, il peut être amélioré en permettant à la lame de tourner légèrement d'elle-même (système "Décrochage actif") pour maximiser l'énergie captée à basse vitesse vent. Pour des vitesses de vent élevées, les pales sont inclinées pour réduire l'angle est réglé pour renforcer l'effet "décrochage" de la lame. L'effet des changements de vitesse L'effet du vent sur le couple mécanique fourni par les éoliennes est donc moins important.

1.5.2.2 Système d'orientation des pales "pitch" :

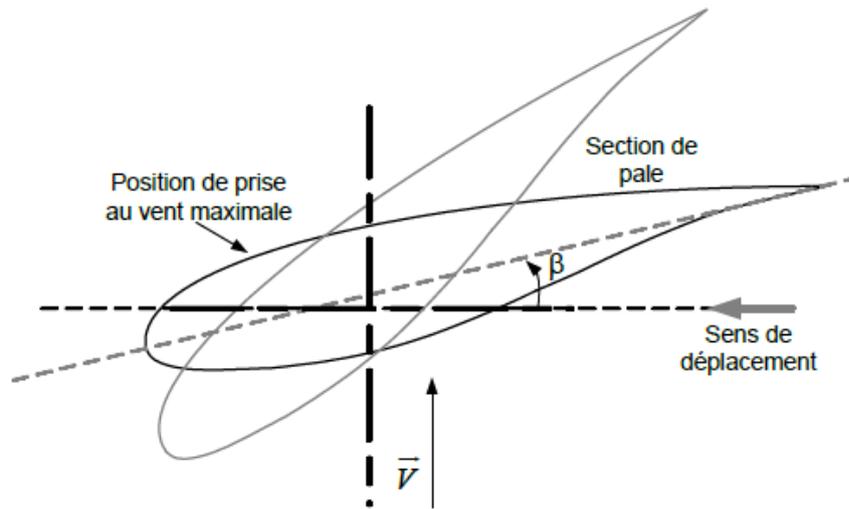


Figure 12.1 : Variation de l'angle de calage d'une pale

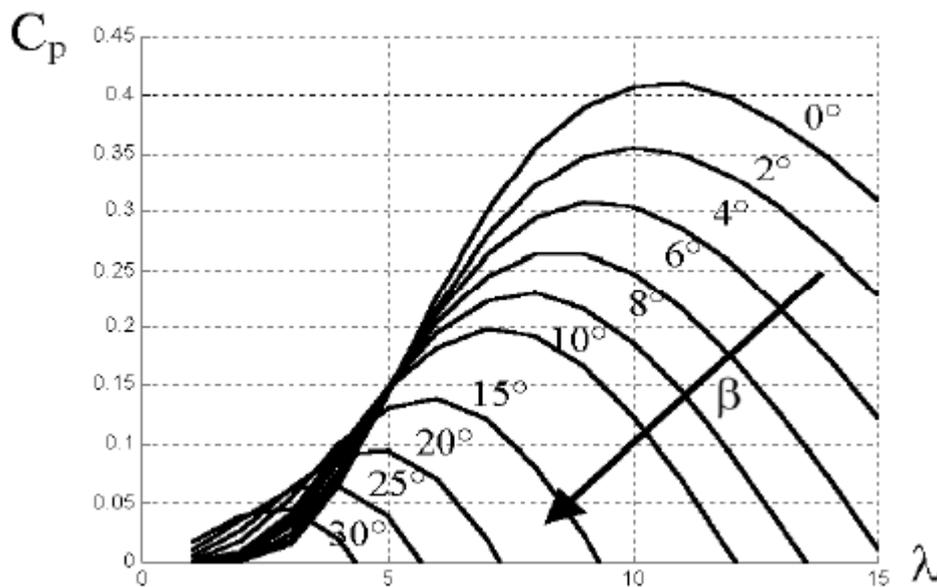


Figure 13.1: Influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple.

1.5.3. Production optimale d'énergie :

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maxima du réseau de courbes de la Figure 1-6. Ce qui signifie que pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe) on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui

correspond à une valeur de λ donnée appelée λ_{opt} . La vitesse de rotation optimale Ω_{opt} résultante est alors donnée par :

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} . v \quad (1.9)$$

La caractéristique correspondant à cette relation est donnée sur la zone II de la Figure (1-11). La zone I correspond aux vitesses de vent très faibles, insuffisantes pour entraîner la rotation de l'éolienne, et la zone III correspond aux vitesses de vent élevées pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale afin de ne pas subir de dégâts.

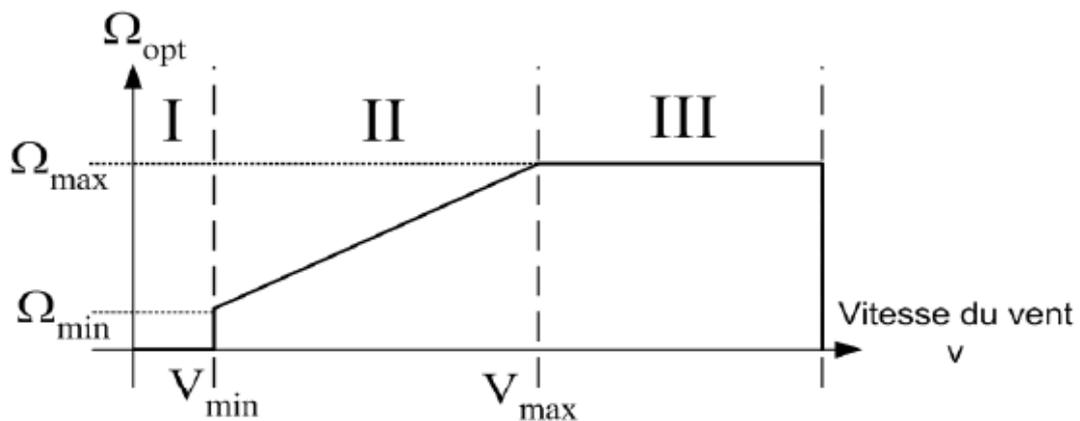


Figure 14.1. : Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable

1.6. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

a) Les avantages :

- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est-à-dire que contrairement aux énergies fossiles.

- L'énergie éolienne n'est plus non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs donc on connaît la durée de vie.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées.
- Les parcs éoliens se démontent facilement.
- L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains :
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie, C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer.
- L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.
- Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.
- Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelles sources d'énergie traditionnelle.

b) Inconvénients :

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a des certains inconvénients :

- L'impact visuel. Ça reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit: le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle - ci évitent les aérogénérateurs.
- La qualité de la puissance électrique : La source d'énergie éolienne étant stochastiques, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.

1.7. Etude et fonctionnement de la Machine Asynchrone

1.7.1. Introduction :

Le moteur asynchrone, ou moteur à induction, est le moteur le plus utilisé dans la plupart des entraînements électrique. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants, ce qui conduit à une structure simple, robuste mécanique et

facile à construire, leur stator est relié directement au réseau industriel à tension et fréquence constante, il tourne à vitesse peu différente de la vitesse de synchronisme, c'est lui qui est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité des entraînements à vitesse constante. Il permet aussi la réalisation d'entraînements à vitesse variable et la place qu'il occupe dans ce domaine ne cesse de croître. Ce chapitre, débute par un rappel sur la constitution de la machine asynchrone ainsi que le principe de fonctionnement, vers les caractéristiques et les applications de la MAS arrivent aux avantages et inconvénients.

1.7.2. Classification de machines électriques tournantes :

Les moteurs électriques sont généralement classés selon le type du réseau électrique dans Le quelle le moteur est relié: moteurs à courant continu (DC) et des moteurs à courant alternatif (CA). Les moteurs avec alimentation AC sont subdivisés en deux synchrones et asynchrones. La différence fondamentale entre une machine à induction et une machine synchrone réside dans la vitesse du rotor de la machine à induction sous charge ne coïncide pas (est asynchrone) avec la vitesse du champ magnétique, généré par la tension d'alimentation. Les moteurs à induction sont divisés en deux catégories principales: monophasé et triphasé, le premier type de moteurs à induction n'est pas étudié dans ce travail. Les moteurs à induction triphasés sont classés en fonction du type du rotor : rotor à cage et rotor bobiné.

La classification principale est illustrée à la figure (2.1) :

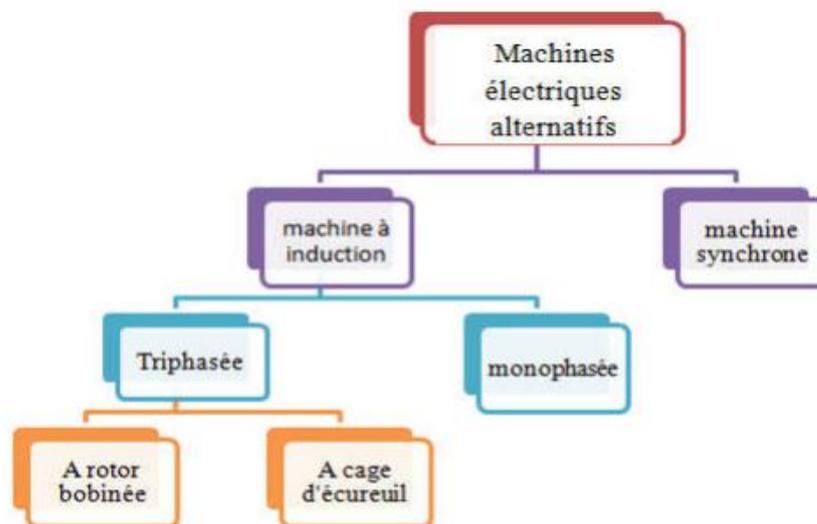


Figure 15.1: Classifications de machines électriques alternatives

1.7.3. Constitution de la machine asynchrone :

La machine asynchrone est composée d'une partie fixe appelée stator et d'une partie tournante appelée rotor (figure 2.2). Contrairement aux machines synchrones et à courant continu, seuls les enroulements statoriques sont couplés à un réseau d'alimentation dont les tensions (amplitude et fréquence) définissent l'état magnétique de l'entrefer. Les enroulements du rotor sont raccordés sur eux-mêmes. Le moteur asynchrone ne possède donc ni enroulement d'excitation ni aimants permanents. Pour ce qui est du flux rotorique nécessaire pour la formation du couple électromagnétique, il est produit à partir de l'induction. La figure (2.2) représente la machine asynchrone. Du point de vue mécanique, la machine asynchrone est subdivisée en trois parties distinctes :

- Le stator : partie immobile est la partie où est connectée l'alimentation électrique
- Le rotor : partie tournante, elle permet de mettre en rotation la charge magnétique
- Les paliers : organes de support, ces derniers constituent la partie mécanique permettant ainsi la mise en rotation de l'arbre moteur.
- L'entrefer : Cette partie est aimantée (c'est le vide entre le rotor et le stator).

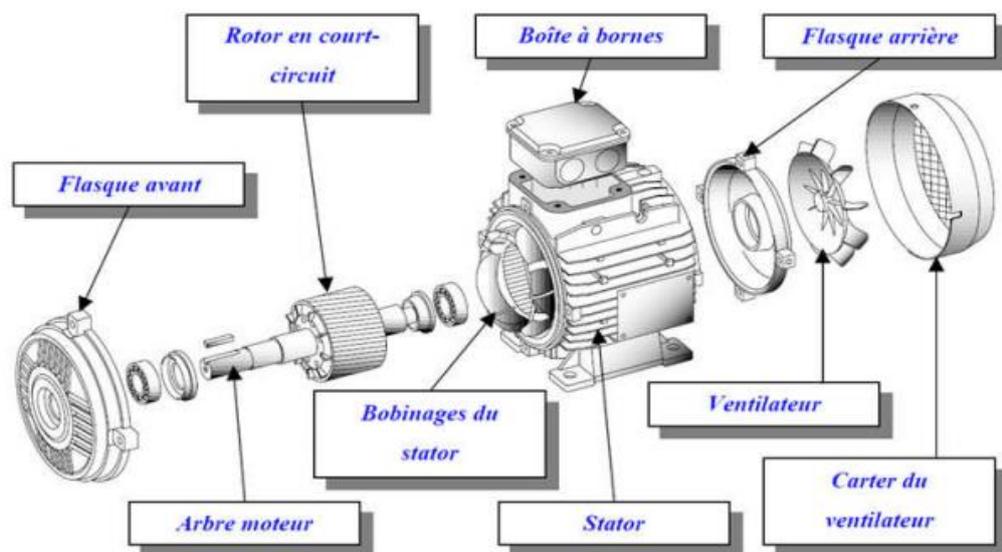


Figure 16.1 : Schéma désignant les éléments constituant une machine asynchrone.

1.7.3.1. Le stator :

C'est la partie fixe du moteur. Une carcasse en fonte ou en alliage léger renferme une couronne de tôles minces (de l'ordre de 0,5 mm d'épaisseur) en acier au silicium. Les tôles sont isolées entre elles par oxydation ou par un vernis isolant. Le « feuilletage » du circuit magnétique réduit les pertes par hystérésis et par courants de Foucault. Les tôles sont munies d'encoches dans les quelles prennent place les enroulements statoriques destinés à produire le champ tournant (trois enroulements dans le cas moteur triphasé). Chaque enroulement est constitué de plusieurs bobines. Le mode de couplage de ces bobines entre elles définit le nombre de paires de pôles du moteur, donc la vitesse de rotation.

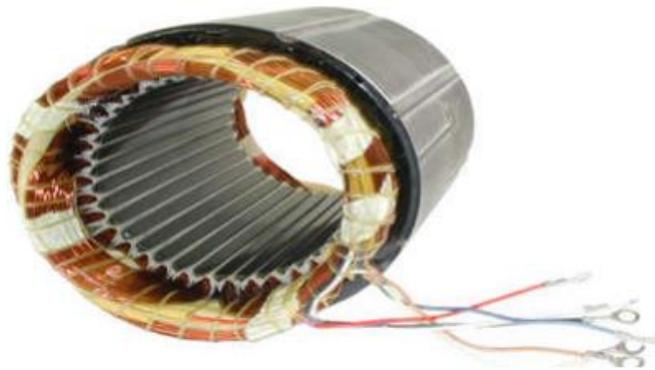


Figure 17.1: schéma présente l'enroulement du stator.

1.7.2.3.2. Rotor (Induit) :

C'est l'élément mobile du moteur. Comme le circuit magnétique du stator, il est constitué d'un empilage de tôles minces, isolées entre elles, et formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. Le rotor est constitué de conducteurs en court-circuit donc n'est relié à aucune alimentation électrique et il tourne à une vitesse (N) inférieure à celle du champ tournant.

Selon la construction du rotor, on peut distinguer deux familles de moteurs asynchrones. Les moteurs à cage dont le rotor forme une cage d'écureuil et les moteurs à bague dont le rotor est bobine.

1.7.3.2.1. Rotor à cage :

Il existe différentes structures de rotor à cage qui dépend principalement de la taille du moteur et de l'application qui lui est destinée. Les enroulements de la cage d'écureuil sont constitués de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits. Ces barres sont court-circuitées à chaque

extrémité par deux anneaux dits «de court-circuit», eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium (figure 2.4). Un autre procédé de fabrication consiste à mouler le circuit électrique rotorique en coulant de l'aluminium dans les encoches fermées aménagées dans le circuit magnétique. L'intérêt essentiel de ce procédé est la grande robustesse du rotor, une fabrication aisée et un faible coût de réalisation pour des machines sans pratiquement aucun entretien. Très souvent, les barres rotoriques sont uniformément inclinées pour limiter les harmoniques d'encoches rotoriques et ainsi diminuer très fortement le bruit lors de l'accélération de la machine asynchrone (figure 2.4). L'isolation des barres rotoriques avec les tôles magnétiques n'est en général pas nécessaire du fait de la faible tension induite aux bornes de chacune d'entre elles. De plus, la résistivité de l'alliage utilisé pour la construction de cette cage est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas à travers les tôles magnétiques, sauf lorsque la cage rotorique présente une rupture de barre. Le rotor de la machine asynchrone est aussi pourvu d'ailettes de ventilation pour permettre un refroidissement de la cage le plus efficace possible.

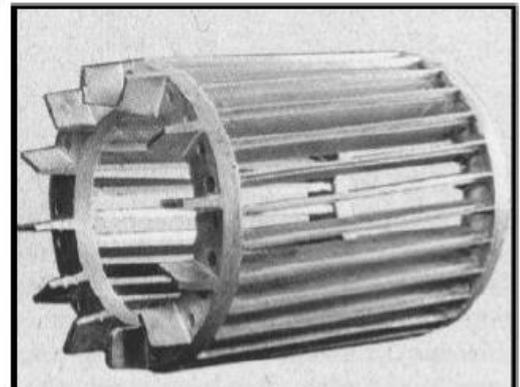


Figure 18.1: Rotor à cage d'un moteur asynchrone triphasé.

1.7.3.2. Rotor bobiné :

Les tôles du rotor sont munies d'encoches dans lesquelles sont placées des conducteurs d'un enroulement triphasé identiques à ceux du stator. Une extrémité de chacun des enroulements est reliée à un point commun (couplage étoile) et l'autre extrémité est reliée à une bague.

On peut accéder à ces bobinages par l'intermédiaire de trois bagues sur lesquelles frottent trois balais, cet accès est plus souvent utilisé pour augmenter le couple de démarrage par l'intermédiaire de résistances situées à l'extérieur de la machine.



Figure 19.1: Rotor bobiné d'un moteur asynchrone triphasé.

1.7.3.3. Les paliers :

Les paliers, supportent l'arbre rotorique, ils sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage. L'ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone à cage d'écureuil.

1.7.3.4. L'entrefer :

Cette partie amagnétique (c'est un vide entre le stator et le rotor) est d'épaisseur la plus faible (de l'ordre du millimètre), cette épaisseur réduite rend la taille de l'entrefer sensible aux variations dues aux encoches statoriques. Ceci crée des harmoniques dites d'encoches, pour les réduire, les encoches sont fermées par des cales magnétiques qui maintiennent le bobinage.

1.7.3.5. Les organes mécaniques :

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces derniers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements.

Pour les machines de petite et moyenne puissance.

Dans La plupart du temps on trouve aussi un ventilateur de refroidissement.

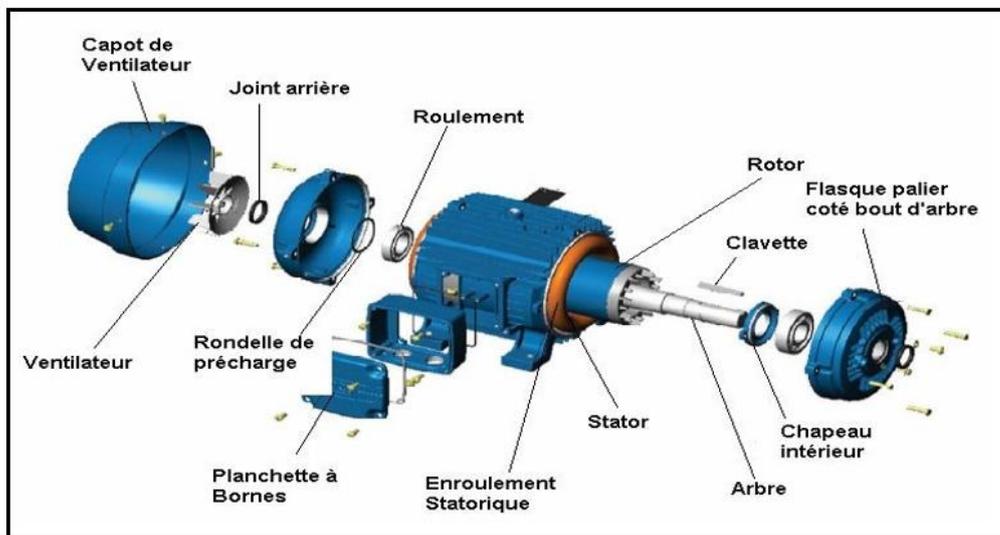


Figure 20.1 : Vue éclatée d'un moteur asynchrone triphasé à cage.

1.7.5. Avantages et inconvénients de la machine asynchrone :

Les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone sont assez nombreux mais les principaux sont résumés dans le tableau suivant :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">✓ Structure simple.✓ Robuste et facile à construire.✓ Coût réduit.✓ Absence d'un système bagues balais.	<ul style="list-style-type: none">✓ Non découplage naturel.✓ Non linéarités.

Tableau 1.1 : Avantages et inconvénients de la machine asynchrone

1.8 Système utilisant les machines asynchrones à cage (MAS)

Les machines électriques asynchrones à cage sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Dans cette structure, le rotor de la machine est couplé à l'arbre de la turbine et ses enroulements sont courts circuits, tandis que le stator est directement connecté au réseau par l'intermédiaire d'un banc de condensateur assurant sa magnétisation (Figure 2.9)

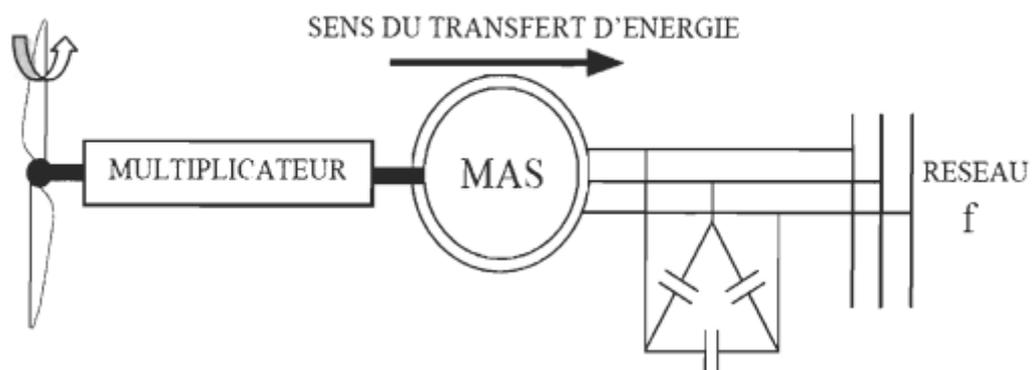


Figure 21.1: Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.

La machine fonctionne sur une plage de vitesse très limitée à cause de son nombre de paires de pôles qui fixe. La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs [5]. La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau) permet de limiter la maintenance sur la machine. L'avantage de cette structure est sa simplicité et son faible coût. Son principal inconvénient est d'une part l'impossibilité de fonctionnement à vitesse variable, ce qui réduit la puissance extraite du vent et d'autre part les problèmes d'accrochage/décrochage au réseau. En plus, ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau. Celui-ci peut-être toutefois amélioré par l'ajout d'un banc condensateur représentées sur la Figure 2.9 qui devient la seule

source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

1.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une brève description de chaînes de conversion de l'énergie éolienne. Nous avons tout d'abord introduit quelques notions sur la conversion mécanique de l'énergie éolienne puis donné un aperçu des deux grandes familles d'éoliennes, à savoir celles à axe horizontal et celles à axe vertical avec leurs avantages et inconvénients. Une fois les différents constituants d'une éolienne présentés, nous avons abordé, dans une seconde partie, les systèmes éoliens de grande production connectés au réseau en présentant les structures les plus répandues.

Nos travaux étant centrés sur l'utilisation de la conversion de l'énergie éolienne pour des sites isolés, la dernière partie de ce chapitre a été consacrée à introduire les différentes solutions utilisées dans ce cadre. En essayant d'être le plus exhaustif possible, nous avons présenté les architectures utilisées pour assurer ce fonctionnement tout en expliquant les différentes variantes et donnant les avantages et inconvénients de chacune d'elles.

Au travers de l'étude des solutions existantes, il apparaît que la structure la plus intéressante du point de vue caractéristiques, performances et prix, demeure la machine asynchrone à cage d'écureuil. Cette machine est robuste, nécessite peu de maintenance et est largement standardisée,

Chapitre 2 : Modélisation d'une Génératrice Asynchrone à Cage en régime linéaire

2.1. Introduction

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'électricité où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement plus de la moitié des éoliennes installées dans le monde. Etant tout à fait réversible, cette machine possède des qualités de robustesse et de faible taux de défaillance intéressantes, son faible coût et l'absence de système de balais-collecteur la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation éolienne. Le dispositif le plus simple et le plus utilisé consiste à insérer entre la turbine et le rotor de la machine asynchrone un multiplicateur de vitesse, et à connecter directement le stator de celle-ci au réseau (fig. 2.1). La majorité des applications en éolien, environ 85% sont à vitesse de rotation fixe et à connexion directe sur le réseau. La machine ayant un nombre de paires de pôles fixe doit fonctionner sur une plage de vitesses limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs.

Ce type de machine consomme de l'énergie réactive pour la magnétisation de son rotor, ce qui détériore le facteur de puissance du réseau, c'est leur inconvénient majeur. Comme solution, on ajoute des batteries de condensateurs. Ce système de fonctionnement à vitesse fixe, malgré sa simplicité n'exploite pas toute la puissance disponible pour des vitesses de vents élevées.

Il est aussi bruyant à cause du système d'orientation des pales qui est souvent en action pour pallier aux variations de vitesse du vent. Pour améliorer le rendement de ce système, certains constructeurs utilisent la machine asynchrone à cage à fréquence variable. Cependant, cette solution est coûteuse du fait qu'elle exige la présence d'un multiplicateur de vitesse et d'un variateur de fréquence, (**Figure 2.1**).

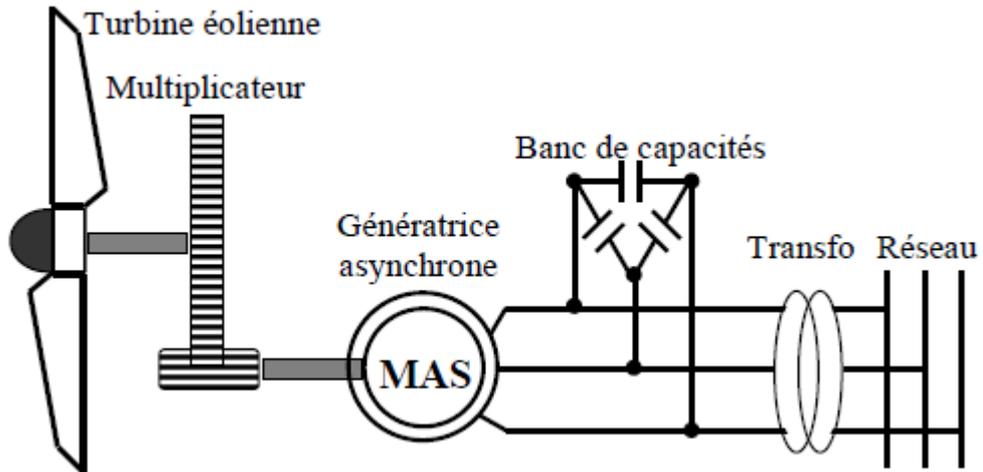


Figure 2.1 : Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse fixe

2.2. La machine à induction

La machine à induction est un système électromécanique couplé à l'aide d'un circuit magnétique. La machine asynchrone triphasée est composée de trois enroulements statoriques fixés séparés entre eux de 120 degrés. Le rotor, cependant, a une structure complètement différente. Il est constitué de barres conductrices court-circuitées par un anneau conducteur à chaque extrémité (Figure 11.3). En raison de sa ressemblance, le rotor s'appelle le rotor à cage d'écureuil.

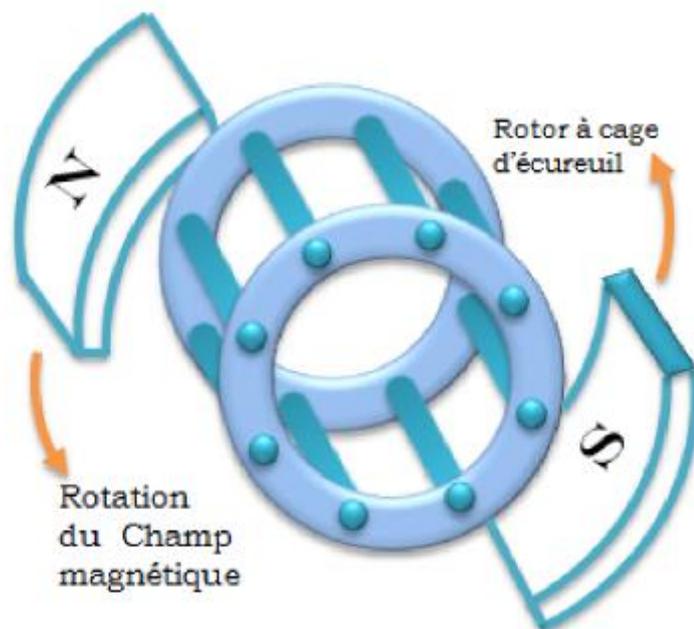


Figure 2.2: Rotor à cage d'écureuil sous le champ magnétique de rotation.

Pour que la machine fonctionne en génératrice, il faut que le rotor tourne dans le sens du champ tournant à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme (vitesse du champ tournant) exprimée par l'équation suivante :

$$\Omega_s = \frac{60f}{p} \quad (2.1)$$

Le rotor développe ainsi son propre champ magnétique. Lorsque cette génératrice est connectée au réseau, il se met à tourner à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de rotation du champ magnétique dans le stator (fonctionnement de type « moteur »). Si la vitesse de rotation du rotor devient égale (synchrone) à celle du champ magnétique, aucune induction n'apparaît dans le rotor, et donc aucune interaction avec le stator. Enfin, si la vitesse de rotation du rotor est légèrement supérieure à celle du champ magnétique du stator, il se développe alors une force électromagnétique similaire à celle obtenue avec un générateur synchrone. La différence (adimensionnée) entre la vitesse de rotation du rotor et la vitesse de rotation du champ magnétique est appelée glissement, sa valeur ne dépassant pas en pratique quelques pour-cent. Il est dangereux que l'éolienne soit amenée à fonctionner dans cette zone, car d'une part la diminution du couple résistant pourrait entraîner une survitesse de la machine et d'autre part la dissipation de puissance dans la génératrice risquerait d'endommager certains éléments par surchauffe. Il faut souligner l'intérêt de ce type de fonctionnement de la génératrice asynchrone car il permet à l'éolienne de subir de faibles variations ponctuelles de la vitesse du vent (rafales) sans solliciter exagérément la transmission (multiplicateur notamment). Dans ce cas, le glissement g de la machine définie par g est négatif.

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \quad (2.2)$$

Avec :

Ω_r : vitesse de rotation du rotor.

f : Fréquence du champ tournant.

p : nombre de paires de pôles.

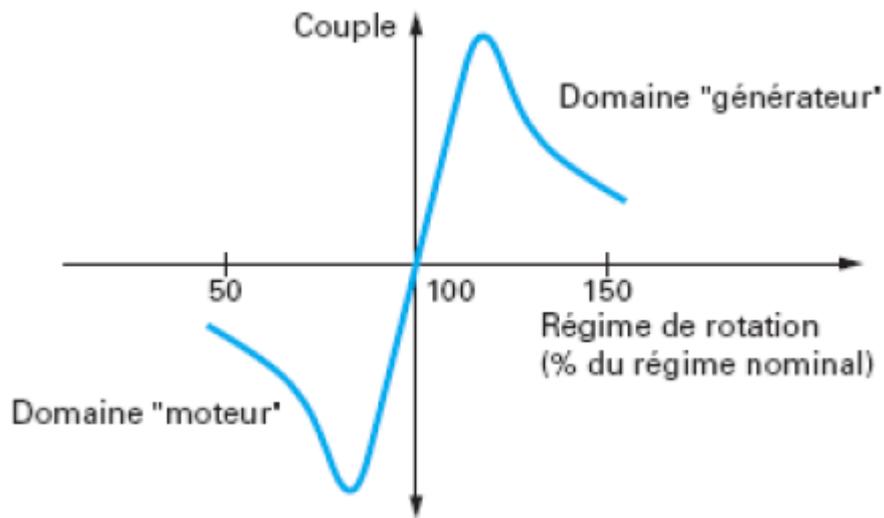


Figure 2.3 : glissement d'une génératrice asynchrone.

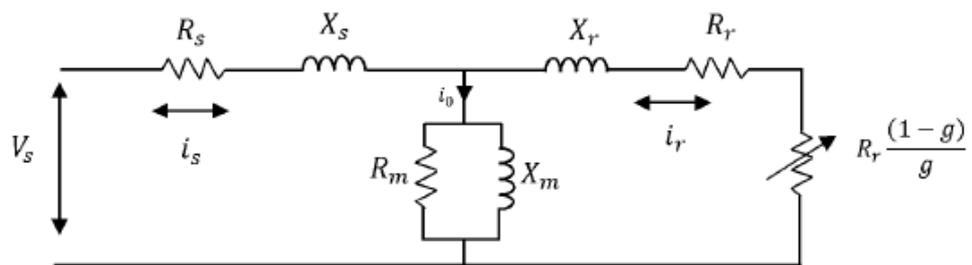


Figure 2.4: Le circuit équivalent d'une phase de la machine à induction rapporté au stator

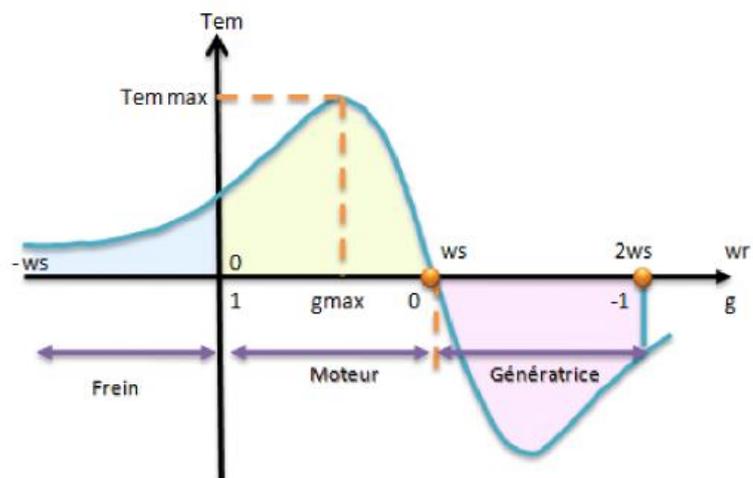


Figure 2.5: Glissement d'une génératrice asynchrone.

2.3. Hypothèses

La machine asynchrone, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, il est alors nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices.

- On suppose les circuits magnétiques non saturés, et suffisamment feuilletés pour que les pertes fer soient négligeables. Les relations entre les flux et les courants sont d'ordres linéaires.
- On considère une densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau est donc négligé.
- Le phénomène hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- Les enroulements statoriques et rotoriques sont symétriques et la *f.e.m* est distribuée sinusoïdalement le long de la périphérie des deux armatures.
- On ne tient compte que du premier harmonique d'espace de distribution de force magnétomotrice de chaque phase du stator et du rotor. L'entrefer est d'épaisseur uniforme (constant), les inductances propres sont constantes. Les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques.
- On considère que la machine fonctionne en régime équilibré.

2.4. Génératrice asynchrone à cage :

La génératrice asynchrone à cage (GAS) n'engendre pas sa propre énergie d'excitation contrairement à l'alternateur. Pour cette raison il faudra lui apporter cette énergie et stabiliser sa tension de sortie et sa fréquence. Ainsi, on connecte aux bornes du stator une batterie de condensateurs correctement dimensionnée et on fait tourner le rotor de la machine à la vitesse nécessaire. La présence d'un flux magnétique rémanent dans le fer du rotor est indispensable pour l'auto amorçage de la génératrice.

La (**Figure 2.3**) représente le schéma de la GAS auto-amorcée.

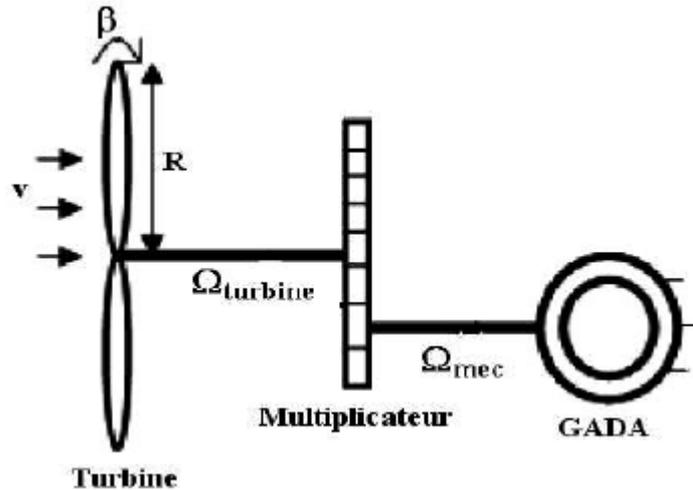


Figure 2.6 Schéma représentatif de la GAS auto-amorcée.

2.5. Modèle real *abc* de la machine asynchrone triphasée

La génératrice asynchrone est constituée de trois enroulements logés symétriquement dans les encoches du stator et de la cage conductrice intégrée au rotor. Indépendamment de la technique employée, le rotor est assimilable à trois enroulements identiques parfaitement symétriques et en court-circuit. La Fig. (3.2) donne une représentation symbolique de la machine où les enroulements statoriques sont déphasés de $2\pi/3$ dans l'espace. La cage du rotor peut être modélisée aussi par trois enroulements déphasés de $2\pi/3$. Cette représentation simplifiée du rotor ne permet pas d'accéder à la connaissance du courant circulant effectivement dans chaque barre mais conduit à une traduction assez fidèle de l'influence des barres rotoriques sur le comportement de la machine. L'angle θ représente la position du rotor.

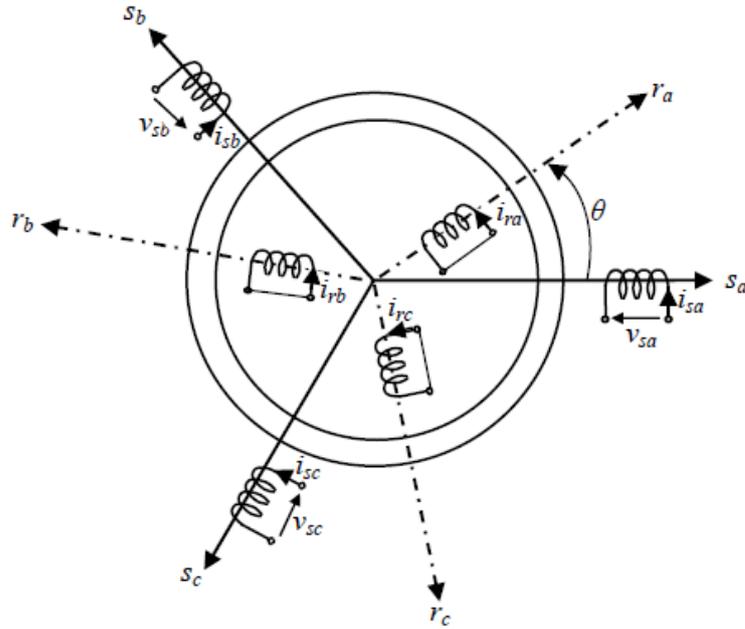


Figure 2.7 : Disposition des enroulements de la machine asynchrone triphasée.

2.5.1. Equations électriques réelles de la génératrice :

L'application de loi de Faraday à la génératrice asynchrone donne la loi des mailles s'exprime par la relation :

$$v = -R * i - \frac{d\phi}{dt} \quad (2.3)$$

En prenant en compte les hypothèses simplificatrices citées précédemment, on peut exprimer le modèle de cette machine en se basant sur les relations suivantes :

Grandeurs statoriques :

$$\begin{cases} v_{as} = -R_s * i_{as} - \frac{d\phi_{as}}{dt} \\ v_{bs} = -R_s * i_{bs} - \frac{d\phi_{bs}}{dt} \\ v_{cs} = -R_s * i_{cs} - \frac{d\phi_{cs}}{dt} \end{cases} \quad (2.4)$$

Grandeurs rotorique :

$$\begin{cases} 0 = R_r * i_{ar} + \frac{d\phi_{ar}}{dt} \\ 0 = R_r * i_{br} + \frac{d\phi_{br}}{dt} \\ 0 = R_r * i_{cr} + \frac{d\phi_{cr}}{dt} \end{cases} \quad (2.5)$$

Ou sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

D'où les formes matricielles condensées :

$$\begin{cases} [v_{abcs}] = -[R_s] * [i_{abcs}] - \frac{d[\phi_{abcs}]}{dt} \\ [0] = [R_r] * [i_{abc0}] + \frac{d[\phi_{abc0}]}{dt} \end{cases} \quad (2.8)$$

v_{as}, v_{bs}, v_{cs} : Tension statorique.

i_{as}, i_{bs}, i_{cs} : Courant statorique

i_{ar}, i_{br}, i_{cr} : Courant rotorique.

$\phi_{as}, \phi_{bs}, \phi_{cs}$: flux statorique

$\phi_{ar}, \phi_{br}, \phi_{cr}$: flux rotorique

$\begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$: Matrice des résistances statorique

$\begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$: Matrice des résistances rotorique

2.5.2. Equation des flux magnétiques

Les équations des flux statoriques et rotoriques et ainsi les inductances propres et des inductances mutuelles est donnée par:

- **Les phases statoriques :**

$$[\phi_{abcs}] = [L_s] * [i_{abcs}] + [L_{sr}] * [i_{abc0}] \quad (2.9)$$

- **Les phases rotoriques :**

$$[\Phi_{abc r}] = [L_{rs}] * [i_{abcs}] + [L_r] * [i_{abc r}] \quad (2.10)$$

[L_s] : Matrice de l'inductance propre et mutuelle entre phase statorique.

[L_r] : Matrice de l'inductance propre et mutuelle entre phase rotorique.

[L_{sr}] : Matrice de l'inductance mutuelle entre phase statorique et rotorique.

On peut récrire l'équation de mas :

$$d[\Phi_{abcs}]/dt = -[v_{abcs}] - [R_s] * [i_{abcs}] \quad (2.11)$$

$$d[\Phi_{abc r}]/dt = [R_s] * [i_{abcs}] \quad (2.12)$$

2.6. Modèle de la GA à cage dans le repère de Park :

Après établissement du modèle électromagnétique de la génératrice dans le repère triphasé en tenant compte des hypothèses simplificatrices, on peut noter sa complexité, ce qui nous oblige à faire appel à des modèles plus simples dans des repères à nombre d'axes réduits permettant facilement la traduction mathématique de la machine, l'étude et l'analyse de son régime transitoire.

Parmi ces modèles, on cite celui le plus utilisé dit modèle de Park. Ce modèle a la possibilité de faire une transformation d'un système triphasé (a, b, c) au système équivalent biphasés généralisé (α, β) et inversement, avec la création des mêmes forces magnétomotrices du champ électromagnétique tournant. Cette transformation est appelée la transformation de Park. Elle est nommée transformation de Park modifiée si on a une conservation de puissance lors de la transition triphasée biphasée et l'inverse.

On désigne par : " α " l'axe direct et par " β " l'axe en quadrature arrière. La rotation dans le sens horaire est introduite par la matrice suivante :

$$[X_{\alpha\beta 0}] = [P(\theta)] * [X_{abc}] \quad (2.13)$$

$$[X_{abc}] = [P(\theta)]^{-1} * [X_{\alpha\beta 0}] \quad (2.14)$$

Pour réaliser cette transformation algébrique on utilise les matrices de Park directe et inverse:

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

La matrice de changement de base $[P(\theta)]$ étant orthonormée, le calcul de sa matrice inverse est très simple:

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Avec :

$\theta = \theta_s$: Pour les grandeurs statoriques.

$\theta = \theta_r$: Pour les grandeurs rotoriques.

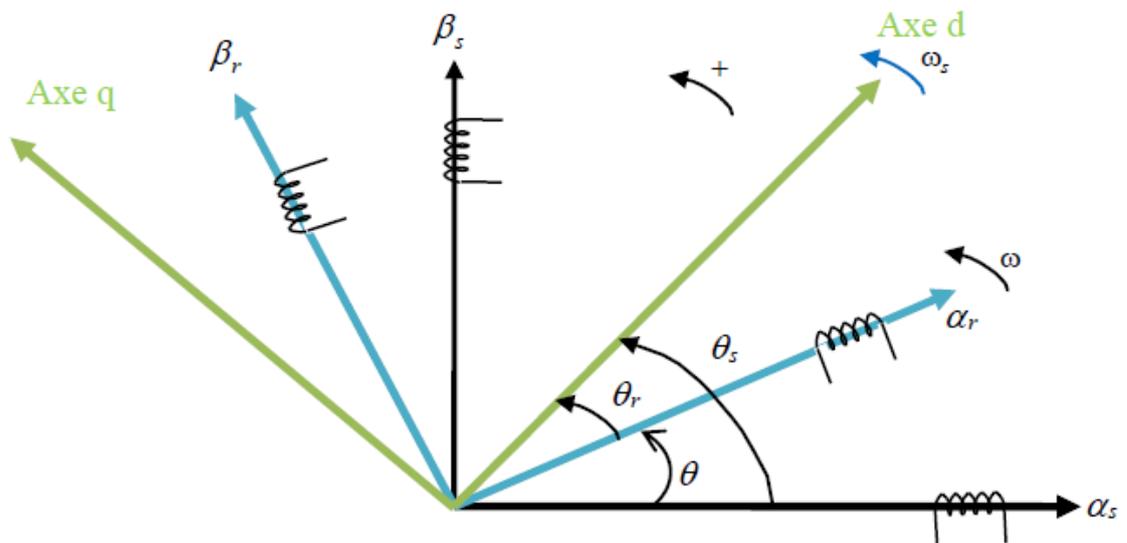


Figure 2.8. : Repères de référence : statorique et rotorique.

$$\begin{cases} \begin{cases} -v\alpha_s = R_s * i\alpha_s - \omega_s * \phi\beta_s + \frac{d\phi\alpha_s}{dt} \\ -v\beta_s = R_s * i\beta_s + \omega_s * \phi\alpha_s + \frac{d\phi\beta_s}{dt} \end{cases} \\ \begin{cases} 0 = R_r * i\alpha_r - (\omega_s - \omega) * \phi\beta_r + \frac{d\phi\alpha_r}{dt} \\ 0 = R_r * i\beta_r - (\omega_s - \omega) * \phi\alpha_r + \frac{d\phi\beta_r}{dt} \end{cases} \end{cases} \quad (2.19)$$

Ou :

$$\begin{cases} \begin{cases} \frac{d\phi\alpha_s}{dt} = -R_s * i\alpha_s + \omega_s * \phi\beta_s + v\alpha_s \\ \frac{d\phi\beta_s}{dt} = -R_s * i\beta_s - \omega_s * \phi\alpha_s + v\beta_s \end{cases} \\ \begin{cases} \frac{d\phi\alpha_r}{dt} = -R_r * i\alpha_r + (\omega_s - \omega) * \phi\beta_r \\ \frac{d\phi\beta_r}{dt} = -R_r * i\beta_r + (\omega_s - \omega) * \phi\alpha_r \end{cases} \end{cases} \quad (2.20)$$

- **Relation flux – courant**

On rappelle les expressions des flux statorique et rotorique dans le référentiel triphasé donnée par les relations (3.20) et (3.21) :

$$[\phi_s] = [L_s] * [i_s] + [L_{sr}] * [i_r] \quad (2.21)$$

$$[\phi_r] = [L_{sr}] * [i_s] + [L_r] * [i_r] \quad (2.22)$$

Après la multiplication d'équation précédente par $[P(\theta_s)]$ et $[P(\theta_r)]$ on obtient :

$$[P(\theta_s)] * [\phi_s] = [L_s] * [P(\theta_s)] * [i_s] + [L_{sr}] * [P(\theta_s)] * [i_r] \quad (2.23)$$

$$[P(\theta_r)] * [\phi_r] = [P(\theta_r)] * [L_{sr}] * [i_s] + [P(\theta_r)] * [L_r] * [i_r] \quad (2.24)$$

Avec :

$[L_{sr}]$: La matrice d'inductance mutuelle entre le stator et le rotor.

Et

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_{aa} & l_{ab} & l_{ab} \\ l_{ab} & l_{aa} & l_{ab} \\ l_{ab} & l_{ab} & l_{aa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{aa} - l_{bb} & 0 & 0 \\ 0 & l_{aa} - l_{bb} & 0 \\ 0 & 0 & l_{aa} - l_{bb} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_{aa} & l_{ab} & l_{ab} \\ l_{ab} & l_{aa} & l_{ab} \\ l_{ab} & l_{ab} & l_{aa} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$L_{sr} = L_{rs} = L$$

$$[L_s] = cte$$

$$[L_r] = cte$$

Finalement, les relations entre flux et courants s'exprime donc par :

$$\begin{cases} \Phi_{\alpha s} = L_s * i_{\alpha s} + L_m * i_{\alpha r} \\ \Phi_{\beta s} = L_s * i_{\beta s} + L_m * i_{\beta r} \\ \Phi_{\alpha r} = L_r * i_{\alpha r} + L_m * i_{\alpha s} \\ \Phi_{\beta r} = L_r * i_{\beta r} + L_m * i_{\beta s} \end{cases} \quad (2.26)$$

Ou :

$$\begin{cases} \Phi_{\alpha s} = \frac{1}{\sigma L_s} * \Phi_{\alpha s} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} * \Phi_{\alpha r} \\ \Phi_{\beta s} = \frac{1}{\sigma L_s} * \Phi_{\beta s} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} * \Phi_{\beta r} \\ \Phi_{\alpha r} = \frac{1}{\sigma L_r} * \Phi_{\alpha r} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} * \Phi_{\alpha s} \\ \Phi_{\beta r} = \frac{1}{\sigma L_r} * \Phi_{\beta r} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} * \Phi_{\beta s} \end{cases} \quad (2.27)$$

La génératrice asynchrone à cage sera représentée dans l'espace électrique par la figure (2.9).

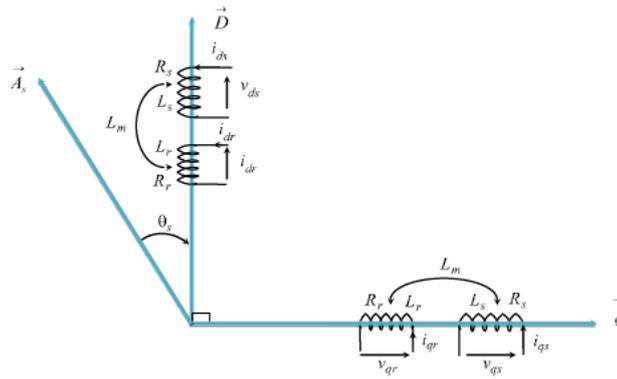


Figure 2.9 : Représentation des enroulements fictifs d'axes 'α' et 'β'.

On 'a:

$$[v] = \begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \\ v_{\alpha r} \\ v_{\beta r} \end{bmatrix}, [i] = \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix}, [v] = \begin{bmatrix} \Phi_{\alpha s} \\ \Phi_{\beta s} \\ \Phi_{\alpha r} \\ \Phi_{\beta r} \end{bmatrix}, [\omega] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s & 0 & 0 \\ \omega_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_r \\ 0 & 0 & \omega_r & 0 \end{bmatrix}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}, [L] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 & 0 \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_r \end{bmatrix},$$

Donc, on peut écrire :

$$[V] = [R] * [I] + \frac{dt}{dt} [\Phi] * [\omega] * [\Phi] \quad (2.28)$$

Avec : $[\Phi] = [L] * [I] \quad (2.29)$

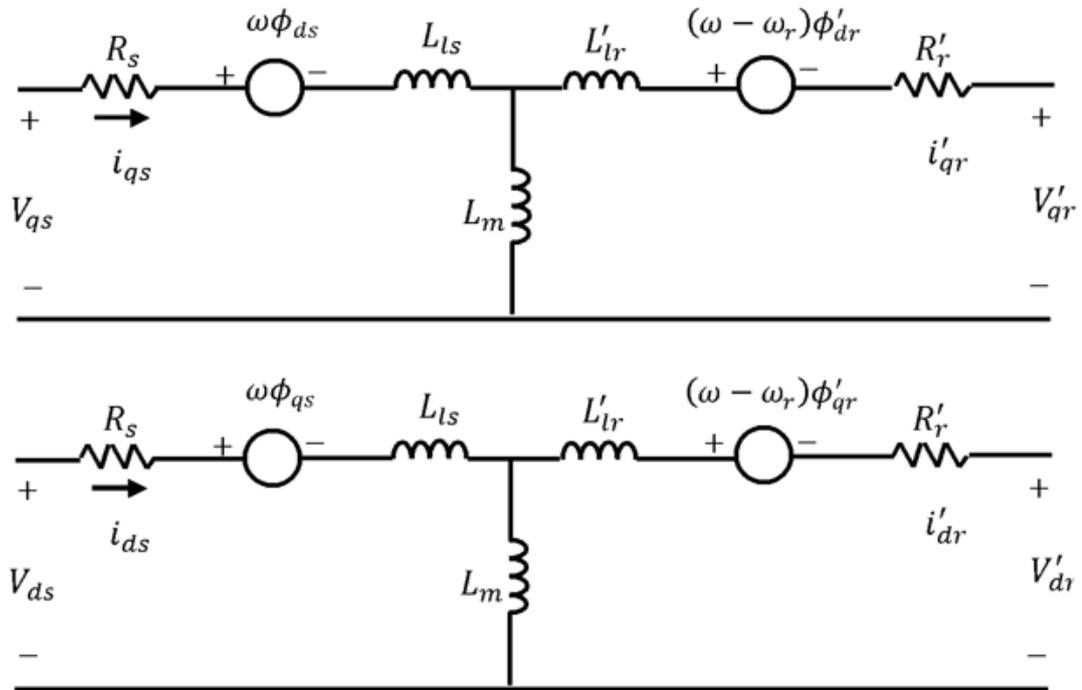


Figure 2.10 : Circuits équivalents dans le repère référentiel $\alpha\beta$ pour une machine à induction triphasée et symétrique.

2.7. Equations de Puissance et de Couple :

Selon Park, la puissance électrique statorique instantanée de la machine s'écrit :

$$P(t) = (v_{\alpha s} * i_{\alpha s} + v_{\beta s} * i_{\beta s}) \quad (2.30)$$

Dans un référentiel lié au champ tournant, en remplaçant $V_{\alpha s}$ et $V_{\beta s}$ par leurs valeurs, la relation précédente multipliée par dt devient :

$$dwe\delta = \frac{3}{2}R_s(i_{\alpha s}^2 + i_{\beta s}^2)dt + \frac{3}{2}(d\phi_{\alpha s} * i_{\alpha s} + d\phi_{\beta s} * i_{\beta s}) + \frac{3}{2}\omega_s(\phi_{\alpha s} * i_{\beta s} + \phi_{\beta s} * i_{\alpha s})dt \quad (2.31)$$

L'énergie électrique fournie au stator pendant le temps dt se décompose ainsi en trois termes :

- Le premier représente l'énergie perdue par effet Joule au stator ;
- Le second représente la variation d'énergie magnétique statorique ;
- Le troisième représente l'énergie transférée du stator au rotor à travers l'entrefer par l'intermédiaire du champ tournant $dW\delta$

Avec :

$$\begin{aligned} dw\delta &= \frac{3}{2}\omega s(\phi\beta_s * i_{as} + \phi\beta_s * i_{as})dt \\ &= \frac{3}{2}R_s(i_{ar}^2 + i_{\beta r}^2)dt + \frac{3}{2}(d\phi\alpha_r * i_{ar} + d\phi\beta_r * i_{\beta r}) + \frac{3}{2}\omega r(\phi\alpha_s * i_{\beta s} + \phi\beta_s * i_{as})dt \end{aligned} \quad (2.32)$$

L'énergie transmittant à travers l'entrefer est donc composée de trois termes : $dW\delta$

- L'énergie perdue par effet Joule au rotor ;
- La variation d'énergie magnétique rotorique ;
- L'énergie transformable en énergie mécanique. dW_{mec}

Le couple électromagnétique développé par le champ tournant s'obtient en divisant le troisième terme de l'équation (2.32) par : $dt\Omega_s$;

$$C_e = \frac{3}{2}P (\phi\alpha_s * i_{\beta s} - \phi\beta_s * i_{as}) \quad (2.33)$$

Le couple mécanique s'obtient en divisant le dernier terme de (2-8) par $dt\Omega_r$;

$$\begin{aligned} C_e &= \frac{3}{2}P L (\phi\alpha_s * i_{\beta s} - \phi\beta_s * i_{as}) = C_e = \frac{3}{2}P (\phi\alpha_r * i_{\beta r} - \phi\beta_r * i_{ar}) \\ &= C_r + j\frac{d\Omega_r}{dt} + f\Omega_r \end{aligned} \quad (2.34)$$

En explicitant les flux statoriques et rotoriques en fonction des inductances, on vérifie que :

$$C_e = \frac{3}{2}P L_m (i_{as} * i_{\beta s} - i_{\beta s} * i_{as}) \quad (2.35)$$

Cette relation très importante met en évidence le fait que le couple résulte de l'interaction de composantes des courants statoriques et rotoriques en quadrature.

2.8. Puissances active et réactive

Les puissances entre la machine et le réseau dépendent des variables électriques du stator et du rotor. Les puissances active apparentes sont données par:

$$\begin{cases} \overline{S}_s = V_s \cdot \overline{I}_s^* \\ \overline{S}_r = V_r \cdot \overline{I}_r^* \end{cases} \quad (2.36)$$

Donc, les expressions des puissances active et réactive aux niveaux du stator et du rotor, respectivement, sont exprimé par :

$$\begin{cases} P_s = \text{Re}[\overline{S}_s] \\ Q_s = \text{Im}[\overline{S}_s] \end{cases} \quad (2.37)$$

$$\begin{cases} P_r = \text{Re}[\overline{S}_r] \\ Q_r = \text{Im}[\overline{S}_r] \end{cases} \quad (2.38)$$

2.9. Modèle d'état de Park :

On prend comme variable d'état $(\phi_{\alpha s} * i_{\beta s} - \phi_{\beta s} * i_{\alpha s})$ dans un repère (α, β) lié au champ tournant à la vitesse de synchronisme. Le système d'équations différentielles de la GA à cage dans le repère de Park s'écrit comme :

$$\begin{cases} \frac{di_{\alpha s}}{dt} = -\frac{1}{\sigma l_s} * \left(r_s + r_r + \frac{L_m^2}{L_r^2} \right) * i_{\alpha s} + \frac{1}{\sigma l_s} * r_r * \frac{L_m}{L_r^2} * \phi_{\alpha s} + \frac{1}{\sigma l_s} * \omega * \frac{L_m}{L_r} * \phi_{\beta r} - \frac{1}{\sigma l_s} * v_{\alpha s} \\ \frac{di_{\beta s}}{dt} = -\frac{1}{\sigma l_s} * \left(r_s + r_r + \frac{L_m^2}{L_r^2} \right) * i_{\beta s} - \frac{1}{\sigma l_s} * \omega * \frac{L_m}{L_r} * \phi_{\alpha r} + \frac{r_r}{\sigma l_s} * \omega * \frac{L_m}{L_r^2} * \phi_{\beta r} - \frac{1}{\sigma l_s} * v_{\beta s} \\ \frac{d\phi_{\alpha s}}{dt} = r_r * \frac{L_m}{L_r} * i_{\alpha s} - \frac{r_r}{l_r} * \phi_{\alpha r} - \omega * \phi_{\beta r} \\ \frac{d\phi_{\beta r}}{dt} = r_r * \frac{L_m}{L_r} * i_{\beta s} - \frac{r_r}{l_r} * \phi_{\beta r} - \omega * \phi_{\alpha r} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (C_m - C_e - f_v \cdot \Omega) \end{cases} \quad (2.39)$$

2.10. La machine Asynchrone auto-excité :

3.6.1. Introduction :

En l'absence de réseau pilote, il est possible d'auto-exciter la génératrice asynchrone au moyen de condensateurs, mais l'amorçage et la protection contre les surtensions de résonance nécessitent une étude très soignée de l'installation. Seul un dispositif basé sur une machine asynchrone auto-excité par des capacités directement

connectées sur une charge permet d'obtenir un fonctionnement purement autonome. Le phénomène d'auto-excitation est en revanche difficile à maîtriser car les variations de charge influent directement sur les valeurs de la tension et la fréquence délivrées. De plus, un dispositif d'orientation des pales de l'éolienne est nécessaire afin de maintenir une vitesse de rotation et par conséquent une fréquence délivrée fixes. Afin de déterminer les performances et les limites de fonctionnement de ce dispositif.

2.10.2 Modélisation de l'auto-amorçage :

En réalisant une analyse simulation d'un générateur auto-excité à induction, il est difficile de déterminer la vitesse correspondante d'obtenir des valeurs constantes d'une La plupart du temps les composants sont en valeurs discrètes. Il est également difficile de voir la condition d'auto-excitation au-delà des valeurs évaluées de la machine car il peut endommager la machine La simulation est extrêmement utile en prévoyant l'état d'auto excitation dans les valeurs évaluées de la machine.

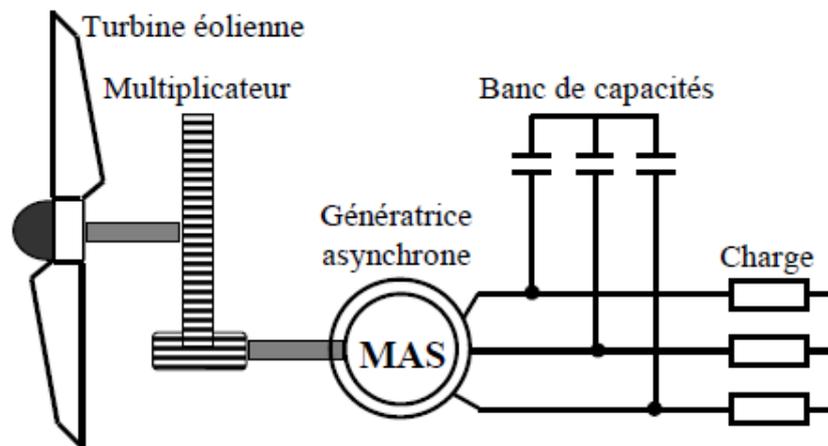


Figure 2.11 – Machine asynchrone auto – excitée avec une batterie de condensateurs.

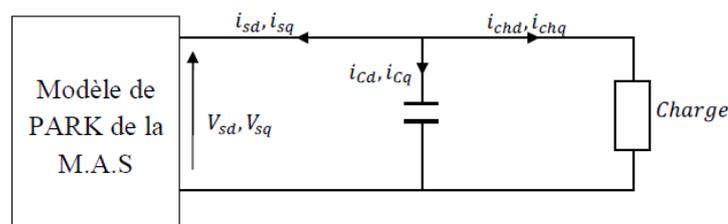


Figure 2.12 : Modèle diphasé de la génératrice auto-amorçable alimentant une charge.

- **Equations électriques :**

En grandeurs de phase, on a :

$$v_{abcs} = \frac{dQ_{abcs}}{dt} \quad (2.40)$$

$$\frac{dv_{abcs}}{dt} = \frac{1}{C} * i_{abcs} \quad (2.41)$$

Après la multiplication de l'équation (2.41) par $[P(\theta_s)]$:

$$\frac{d[v_{abcs}]}{dt} * [P(\theta_s)] = \frac{1}{C} * [i_{abcs}] * [P(\theta_s)] \quad (2.42)$$

$$\frac{dv_{\alpha\beta}}{dt} = \frac{1}{C} * i_{\alpha\beta s} \quad (2.43)$$

Système doux :

$$\begin{cases} \frac{dv_{\alpha}}{dt} = \frac{1}{C} * i_{\alpha\beta s} \\ \frac{dv_{\beta}}{dt} = \frac{1}{C} * i_{\alpha\beta s} \end{cases} \quad (2.44)$$

2.10.3. Auto-excitation de la génératrice à Vide

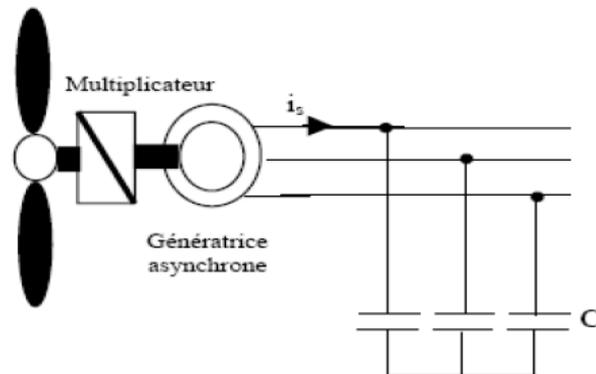


Figure 2.13 : schéma de principe.

Considérons une génératrice asynchrone débitant sur un réseau d'impédance Z_{ch} (Figure 2.14).

$$\text{On a : } V_s = Z_{tot} \cdot I_s = -Z_{ch} \cdot I_s$$

Où représente Z_{tot} l'impédance résultante vue des bornes de la génératrice.

$Q_c = 3V_s^2 C \omega$ Lorsque les condensateurs sont connectés en étoile.

$Q_c = 3U_s^2 C \omega$ Lorsque les condensateurs sont connectés en triangle.

$$Z_{tot} = R_s + j\omega L\sigma_s + \frac{j\omega Lhs(\frac{R_r'}{g} + j\omega L'\sigma_r)}{\frac{R_r'}{g} + j\omega(L'\sigma_r + Lhs)} \quad (2.45)$$

Avec :

$L\sigma_s$ et $L\sigma_r$: Les inductances de fuites au stator et au rotor.

Lhs : L'inductance cyclique du stator.

ω : La pulsation statorique en régime d'auto-excitation.

En simplifiant l'équation (2.45), on trouve :

$$Z_{res} = Z_{tot} + Z_{ch} = 0$$

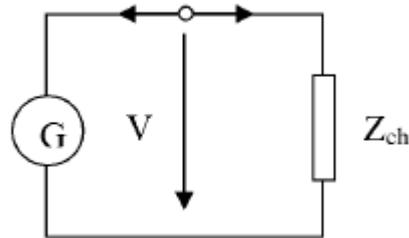


Figure 2.14 : Schéma équivalent d'une génératrice asynchrone auto-excitée

Si la génératrice est déconnectée du réseau et chargée sur des condensateurs tels que

$$Z_{ch} = \frac{J}{c\omega}$$

Le fonctionnement stable de la génératrice asynchrone auto-excitée sera assuré si

l'équation est satisfaite, c'est-à-dire si l'impédance résultante du circuit de la

(Figure 2.15), calculée selon l'expression (3-3) est telle que :

$$\text{Re}(Z_{res}) = 0$$

$$\text{Im}(Z_{res}) = 0$$

Le phénomène d'amorçage de l'auto-excitation correspond au passage d'un état d'équilibre instable (début de l'amorçage) à un état d'équilibre stable (point de fonctionnement final) défini par les conditions (3-4). Par conséquent l'amorçage ne peut se produire que si l'énergie fournie au système par l'organe d'entraînement (ici la turbine éolienne) est supérieure à l'énergie consommée dans les résistances R_s' et. La puissance fournie au système correspond à la puissance dissipée dans la résistance $r' \frac{1-g}{g}$.

La condition d'autoamorçage peut, dès lors, s'exprimer sous la forme simple :

On a :

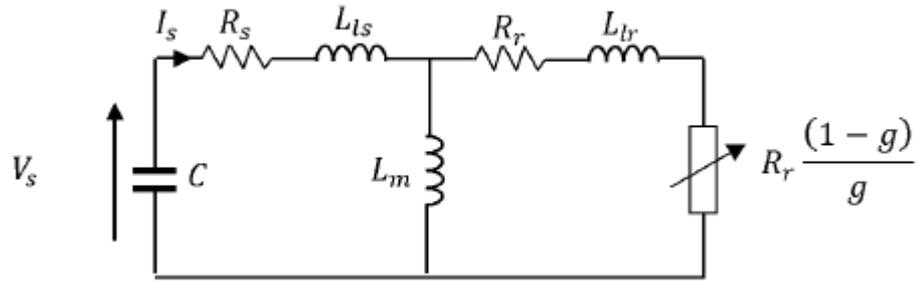


Figure 2.15 : Schéma équivalent d'une génératrice asynchrone auto-excitée.

$$Z_{tot} = R_s + j\omega L\sigma_s + \frac{j\omega L_{hs}(\frac{R_r'}{g} + j\omega L'\sigma_r)}{\frac{R_r'}{g} + j\omega(L'\sigma + L_{hs})} = R_s + j(\omega L\sigma_s - \frac{1}{\omega C}) + \frac{\omega^2 L_{hs}^2 \frac{R_r'}{g} + j\omega L_{hs}[\omega^2 L' r L\sigma_r + (\frac{R_r'}{g})^2]}{(\frac{R_r'}{g})^2 + \omega^2 L'^2 r^2} \quad (2.46)$$

Avec : $L'_r = L_{hs} + L'_{\sigma r}$

La partie réelle est égale à :

$$\text{Re}(Z_{res}) = R_s + \frac{\omega^2 L_{hs}^2 \frac{R_r'}{g}}{\omega^2 L'^2 r^2 + (\frac{R_r'}{g})^2} \quad (2.47)$$

La Figure 2.16 représente la variation $\text{Re}(Z_{res})$ de en fonction de g .

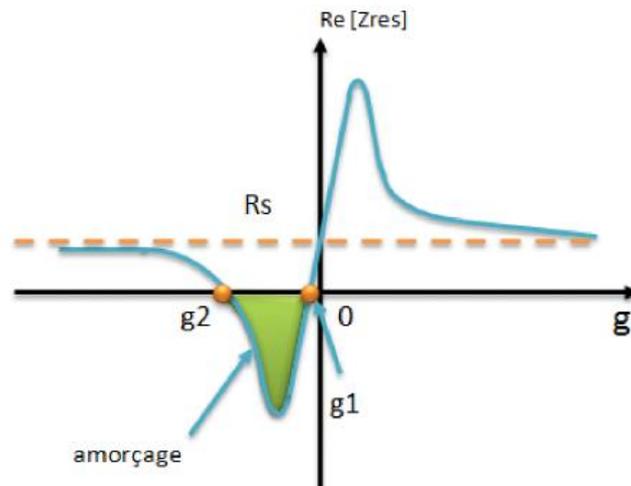


Figure 2.16 : Détermination du domaine d'amorçage.

Cette fonction a pour asymptote et ne peut être négative que pour des valeurs de comprises entre g_1 et g_2 . La condition d'amorçage s'exprime par conséquent comme : $g_2 < g < g_1$

Pour des valeurs très faibles de g , on peut négliger le terme $\omega^2 L^2$ et on trouve :

$$\text{Re}(Z_{res}) = R_s + \frac{\omega^2 L_{hs}^2}{R_r} g \quad (2.48)$$

D'où, pour $\text{Re}(Z_{res}) = 0$:

$$g \cong -\frac{R_s R_r'}{\omega^2 L_{hs}^2} = 0 \quad (2.49)$$

La machine tourne pratiquement à sa vitesse de synchronisme.

Pour des grandes valeurs de, il vient : g

$$\text{Re}(Z_{res}) \cong R_s + \frac{\omega^2 L_{hs}^2 R_r'}{\omega^2 L' r^2 g} \cong R_s + \frac{R_r'}{g} \quad (2.50)$$

D'où :

$$g = -\frac{R_s}{R_r'} \quad (2.51)$$

Connaissant les glissements limites et, on déduit les valeurs extrêmes de la capacité C , qui définissent le domaine dans lequel l'amorçage peut avoir lieu. La génératrice asynchrone ne recevant d'autre énergie réactive que celle provenant de la capacité C , on a selon (3-4) : g_1 et g_2

$$\text{Im}(Z_{res}) = \omega L_{\sigma s} - \frac{1}{\omega C} + \frac{\omega L_{hs} [\omega^2 L' r L_{\sigma r} + (\frac{R_r'}{g})^2]}{(\frac{R_r'}{g})^2 + \omega^2 L' r^2} \quad (2.52)$$

Pour, $g=g_1=0$ on a $\omega_1 = \omega r$, d'où :

$$\omega_r L_{\sigma s} - \frac{1}{\omega_r C_1} + \omega_r L_{hs} \cong 0 \quad (2.53)$$

$$\omega_r L_s - \frac{1}{\omega_r C_1} \cong 0 \Rightarrow C_1 \cong \frac{1}{\omega_r^2 L_s} \quad (2.54)$$

Avec : $L_s = L_{sh} + L_{\sigma r}$

La capacité C_1 correspond à la résonance avec l'inductance propre statorique L_s .

Comme $g=g1=1$, la machine génère la fréquence nominale en tournant pratiquement à la vitesse de synchronisme définie par son nombre de pôles.

Pour $g=g1=\frac{rs}{rr'}$ on a :

$$\omega r = (1 - g2)\omega 2 = \frac{Rs + Rr'}{Rr'} \omega 2 \cong 2 * \omega 2$$

D'où :

$$C2 \cong \frac{1}{\omega r^2(L\sigma s + L'\sigma r)} = \frac{1}{\omega r^2(L\sigma s + L'\sigma r)} \left[\frac{Rs + Rr'}{Rr'} \right]^2 \quad (2.55)$$

La capacité $C2$ correspond à la résonance avec l'inductance de court-circuit de la machine. Cette solution n'est pas intéressante car, pour générer la fréquence nominale, la machine doit tourner pratiquement au double de sa vitesse de synchronisme.

2.10.4. Auto-excitation de la génératrice en charge

Dans le cas où une charge purement résistive R est connectée au stator de la machine, le schéma équivalent par phase de l'ensemble machine – capacité d'auto excitation

- charge peut alors être modifié comme indiqué sur la **Figure 2.17** de façon à pouvoir exploiter les équations précédentes d'autoamorçage à vide à fin de simplifier les calculs. Ainsi on retrouve une nouvelle résistance R' en série avec Rs et une nouvelle capacité qui nous donne la configuration à vide.

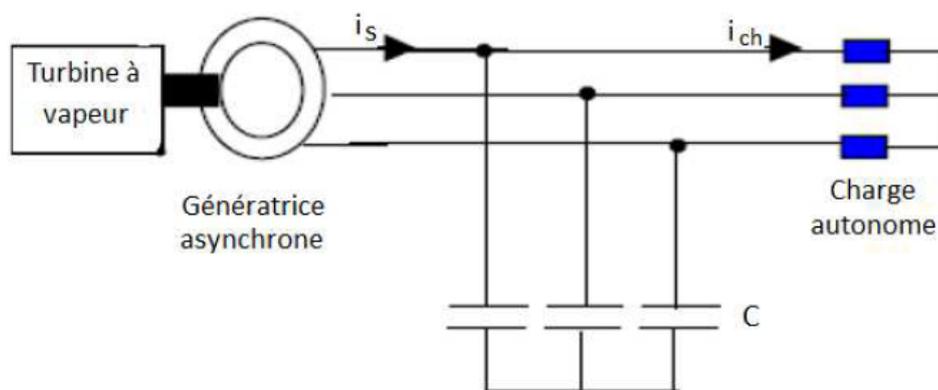


Figure 2.17 : Schéma de principe.

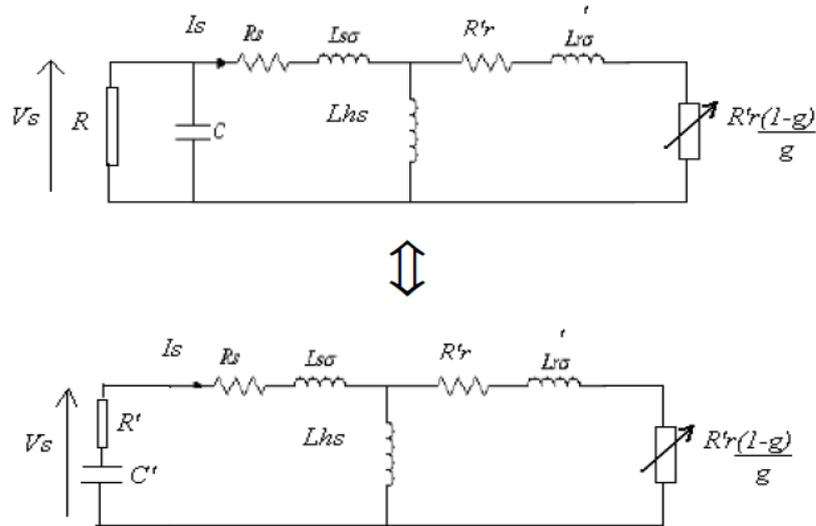


Figure 2.18 : Schéma équivalent de la génératrice avec une charge résistive.

Avec :

$$R' = \frac{R}{1 + \omega^2 R^2 C^2} \quad (2.56)$$

Et

$$C' = \frac{1 + \omega^2 R^2 C^2}{\omega^2 R^2 C} \quad (2.57)$$

En remplaçant dans les équations précédentes on obtient :

Pour $g=g_1$,

$$\begin{aligned} \omega_1 L_{\sigma} - \frac{1}{\omega_1 C_1} + \omega_1 L_{hs} &\cong 0 \\ \omega_1 L_s - \frac{1}{\omega_r C_1'} &\cong 0 \Rightarrow C_1' \cong \frac{1}{\omega_1^2 L_s} \end{aligned} \quad (2.58)$$

La capacité ' C_1 correspond à la résonance avec l'inductance propre statorique L_s .

Comme $g = g_1 = 0$, la machine génère la fréquence nominale en tournant à une vitesse sensiblement supérieure à la vitesse de synchronisme.

Pour : $g = g_2 \cong -\frac{R_s + R'}{R_r'} < -1$, on

$$\omega_r = (1 - g_2)\omega_2 = \frac{R_s + R' + R_r'}{R_r'} \omega_2 > 2\omega_2$$

$$\omega_2 L_{\sigma} - \frac{1}{\omega_2 C_2'} + \omega_2 L_{hs} \frac{L_{\sigma}'}{L_r'} \cong \omega_2 (L_{\sigma s} + L_{\sigma r}') - \frac{1}{\omega_2 C_2'} \cong 0 \quad (2.59)$$

D'où :

$$C_2' = \frac{1}{\omega_2^2 (L_{\sigma s} + L_{\sigma r}')} = \frac{1}{\omega_2^2 (L_{\sigma s} + L_{\sigma r}') \left[\frac{R_s + R' + R_r'}{R_r'} \right]} \quad (2.60)$$

La capacité correspond à la résonance avec l'inductance de court-circuit de la machine. Cette solution n'est pas intéressante car, pour générer la fréquence nominale, la machine doit tourner au plus du double de sa vitesse de synchronisme, donc ce résultat est automatiquement rejeté. Ainsi on peut calculer la capacité minimale C_2 à partir des équations (2-57) et (2-60) en résolvant l'équation (2.56) ; on trouve la capacité :

$$C = \frac{\omega^2 C_1' R^2 \pm \sqrt{\omega^4 C_1'^2 R^4 - 4\omega^2 R^2}}{2\omega^2 R^2} \quad (2.61)$$

L'utilisation de la machine asynchrone auto-excitée dans un système éolien doit prendre en considération les limites de fonctionnement observées. Celles-ci concernent également les variations des tensions et de la fréquence lors des impacts de charge et des éventuels écarts de vitesse dus à l'imprécision du dispositif d'orientation des pales de l'éolienne. Les risques de démagnétisation en cas de surcharge de la machine sont également à prendre en compte car ils nécessitent une intervention externe ou une phase de fonctionnement spécifique afin démagnétiser la machine. Le principe de la machine asynchrone auto-excitée peut cependant être amélioré grâce à un dispositif d'électronique de puissance. Toutefois, l'avantage de la simplicité est alors perdu et il semble préférable de se tourner vers une autre structure.

2.10.5. Comportement de la génératrice lors de la connexion au réseau

Pour les régions éloignées, les éoliennes sont utilisées pour alimenter une certaine charge, mais Si possible, il est préférable de connecter la machine au réseau, pour lequel le générateur Doit tourner à vitesse constante. Pour la mise en service du générateur, il est Auparavant, il était auto-excité lors du passage au réseau. Ce dernier a également Dispositif qui se referme automatiquement ou se connecte au bus en cas de défaut Le déclencheur de la machine. Phénomènes transitoires importants lors de la connexion Provenant de générateurs .En fait, cela dépend du déphasage entre les tensions Ses bornes

et bornes réseau et couple de blocage, courant et couple électromagnétique La valeur transitoire est proche de la valeur de démarrage direct dans des conditions favorables, et Dans des situations défavorables, la valeur est beaucoup plus grande. La machine subit alors des chocs et devra donc être dimensionnée en conséquence.

Afin de mieux interpréter le régime dynamique résultant, nous allons déterminer les expressions analytiques des courants et du couple.

Supposons les résistances statorique et rotorique nulles. Avant la connexion, les courants statoriques de la machine en régime permanent et les tensions du réseau sont donnés dans le repère $(\alpha - \beta)$ par:

$$\begin{cases} i\alpha s(t) = \sqrt{3} I \sin(\omega t + \vartheta - \theta s) \\ i\beta s(t) = -\sqrt{3} I \sin(\omega t + \vartheta - \theta s) \\ i\alpha r(t) = \sqrt{3} I \sin(\omega t + \varphi - \theta s) \\ i\beta r(t) = -\sqrt{3} I \sin(\omega t + \varphi - \theta s) \end{cases} \quad (2.62)$$

ϑ Et φ représentent respectivement les déphasages des courants statoriques et des tensions du réseau par rapport aux tensions statoriques de la machine.

Choisissons $\omega t + \vartheta - \theta s = \frac{\pi}{2}$ pour simplifier le calcul et posons $\Psi = \varphi - \vartheta + \frac{\pi}{2}$

En remplaçant les flux par leurs valeurs de (2-5) dans (2-3) et (2-4) et en appliquant la transformation de Laplace, on obtient

$$\begin{cases} \frac{\sqrt{3} V \sin(\Psi)}{P} = pLsI\alpha s - Ls\omega I\beta s + PLmI\alpha r - Lm\omega I\beta r - Lmsi(0) \\ \frac{-V \cos(\Psi)}{P} = pLsI\alpha s - PLs\omega I\beta s + LmI\alpha r - L\omega mI\alpha r - PLmI\beta r \\ 0 = PLmI\alpha s + PLrI\alpha r - Lsi(0) \\ 0 = PLmI\beta s + PLrI\beta r \end{cases} \quad (2.63)$$

On a :

$$i\alpha s = \frac{\sqrt{3}v}{\sigma Lr} \left[\frac{\sin \Psi}{p^2 + \omega^2} - \frac{\omega \cos \Psi}{p(p^2 + \omega^2)} \right] - \sqrt{3}i \left[\frac{P}{p^2 + \omega^2} - \frac{(1-\sigma) \omega^2}{\sigma (p^2 + \omega^2)} \right] \quad (2.64)$$

$$i\beta s = \frac{\sqrt{3}v}{\sigma Ls} \left[\frac{\cos \Psi}{p^2 + \omega^2} - \frac{\omega \sin \Psi}{p(p^2 + \omega^2)} \right] - \sqrt{3}i \left[\frac{\omega^2}{\sigma (p^2 + \omega^2)} \right] \quad (2.65)$$

En passant par la transformation inverse de Park, l'expression du courant statorique devient :

$$i\alpha s = \frac{\sqrt{2}}{\sigma} \left[\frac{v}{Ls\omega} \cos \varphi + i \sin \alpha - \frac{v}{ls\omega} \cos(\omega t + \varphi) - i(1 - \sigma) \sin(\omega t + \alpha) \right] \quad (2.66)$$

Le couple électromagnétique s'exprime par :

$$C_e(t) = 3P \frac{L_m^2}{\sigma L_r} \left[-\frac{v}{L_s \omega} \cos(\varphi - \alpha) + \frac{v}{L_s \omega} \cos(\varphi - \alpha) \cos \omega t + \left[\frac{v}{L_s \omega} \sin(\varphi - \alpha) - i \right] \sin \omega t \right] \quad (2.67)$$

Pour tenir compte des résistances, on multiplie les expressions du courant et du couple par :

$$\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad \text{Ou } \tau = \frac{2}{\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r}} \quad (2.68)$$

On s'aperçoit que lors de la connexion au réseau, l'amplitude du pic de courant $i(t)$ est maximale lorsque $\cos \varphi = -1$, en d'autres termes, lorsque le déphasage entre la tension statorique de la machine et celle du réseau degrés $\varphi = 180$ pour une vitesse de rotation valant celle du synchronisme. Ce phénomène sera interpréter dans le paragraphe suivant.

2.10.6. Détermination de la valeur des capacités d'auto-amorçage

Considérons la simplification au schéma équivalent du stator d'une certaine phase du moteur Asynchrone dans la **Figure 3.14**, où L_f est l'inductance de fuite totale et M est l'inductance Aimantation, résistance rotorique $R'r$ ramène le stator et g glissement. La machine est Roulez à une vitesse synchrone, de sorte que la résistance $R'r/g$ soit infinie. Courant I Par conséquent, le courant dans l'inductance magnétisante équivaut à traverser Condensateur.

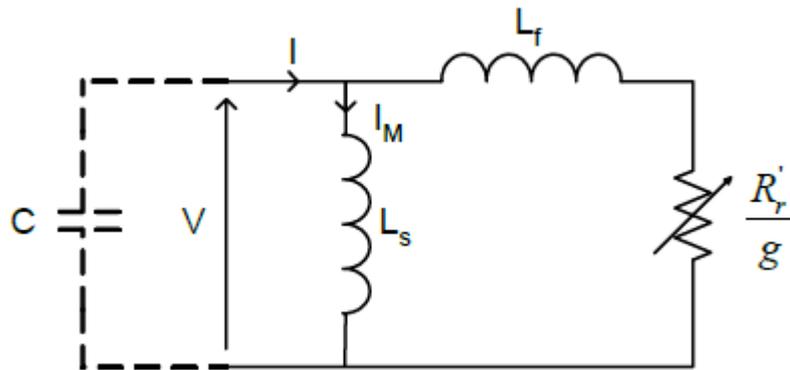


Figure 2.19 : Schéma équivalent simplifié d'une phase de la machine asynchrone ramené au Stator

Dans le cas où une charge purement résistive R est connectée au stator de la machine, le schéma équivalent par phase de l'ensemble machine - capacité d'auto-excitation - charge peut alors être modifié comme indiqué sur la Figure 2.20b

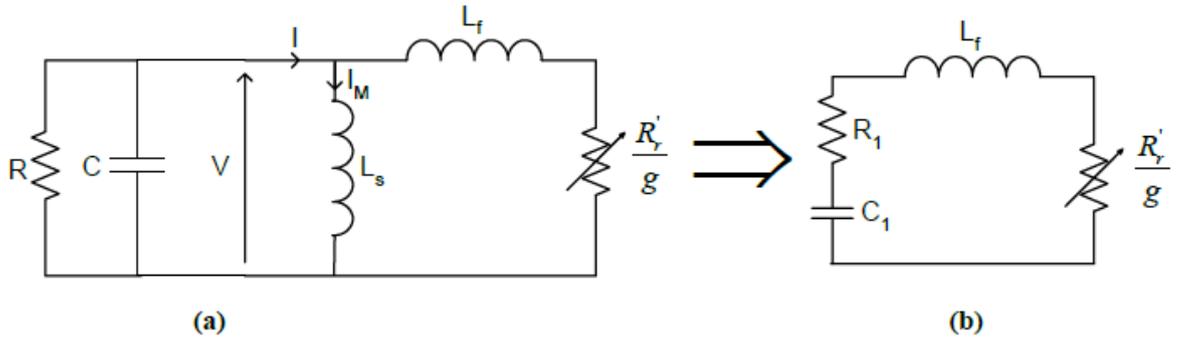


Figure 2.20 : Transformation du schéma équivalent

Dans cette représentation, les éléments R_1 et C_1 peuvent être exprimés en fonction des éléments du schéma équivalent classique (Figure 2.20a) [32]:

$$R_1 = \frac{R}{1 + \left[R \left(C\omega_s - \frac{1}{L_s\omega_s} \right) \right]^2} ; C_1 = \frac{1 + \left[R \left(C\omega_s - \frac{1}{L_s\omega_s} \right) \right]^2}{R^2 \left(C\omega_s - \frac{1}{L_s\omega_s} \right)} \quad (2.69)$$

L'auto-amorçage de la machine ne peut avoir lieu que si la puissance apparente qu'elle produit correspond à celle qu'elle absorbe. Pour la partie puissance réactive, on doit alors satisfaire l'égalité suivante :

$$L_f\omega_s - \frac{1}{C_1\omega_s} = 0$$

Soit :

$$L_f = \frac{R^2 L_s (L_s C \omega_s^2 - 1)}{(L_s \omega_s)^2 + R^2 (L_s C \omega_s^2 - 1)^2} = F(\omega_s) \quad (2.70)$$

Cette inductance L_f doit bien évidemment être positive, une condition nécessaire à l'amorçage est donc :

$$L_s C \omega_s^2 > 1$$

Cette condition indique que la valeur minimale qui provoque l'auto-amorçage est Inductance du stator de circulation et pulsation et glissement du rotor. Cette La caractéristique $F(\omega_s)$ est la suivante (**Figure 2.21**) :

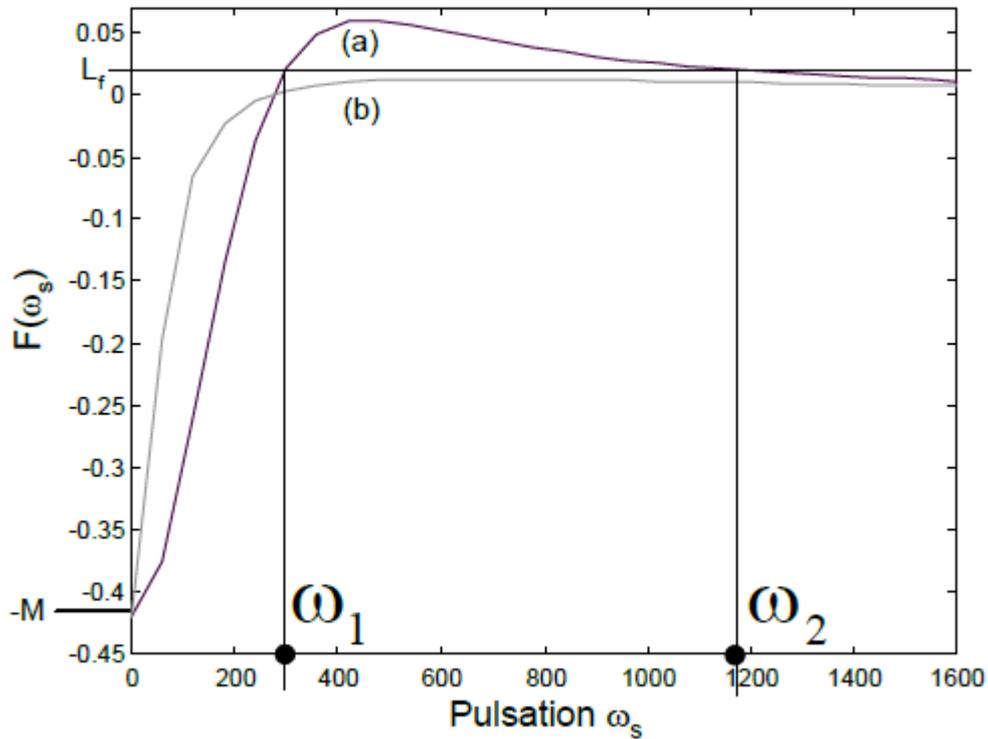


Figure 2.21 : Caractéristique $F(\omega_s)$.

Si $F(\omega_s)$ est toujours inférieure à L_f , (courbe b), il n'y a pas d'amorçage possible. Dans le cas contraire (courbe a), il existe deux pulsations ω_1 et ω_2 vérifiant l'équation (2.15). En pratique, seule ω_1 est intéressante car ω_2 correspond à un fonctionnement instable. Pour la partie puissance active, on doit satisfaire l'égalité suivante :

$$\frac{R_r'}{g} + R_1 = 0 \quad (2.71)$$

Soit :

$$g = -\frac{R_r'}{R} \left[1 + R^2 \left(C\omega_s - \frac{1}{M\omega_s} \right)^2 \right] = -G(\omega_s) \quad (2.92)$$

La caractéristique $G(\omega_s)$ (Figure 2.22) montre que deux glissements g_1 et g_2 correspondent aux pulsations ω_1 et ω_2 déduites précédemment. On vérifie bien que la pulsation ω_2 conduit à un glissement trop élevé.

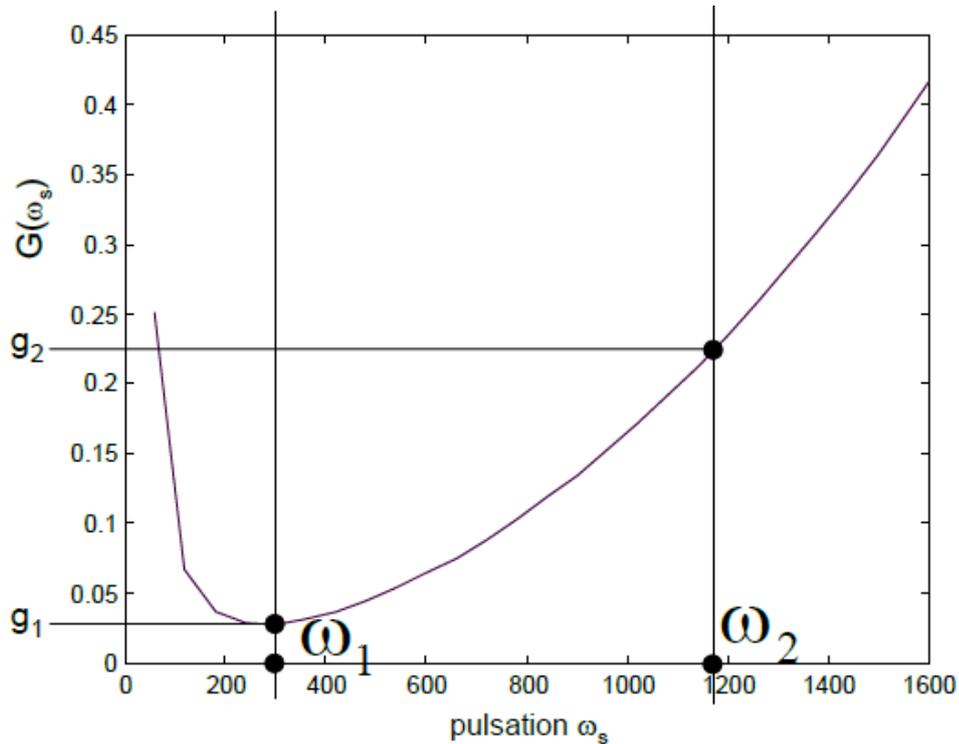


Figure 2.22 : Caractéristique $G(\omega_s)$

2.10.7. Modélisation de la charge :

Le modèle de machine qui est construit et les paramètres qui sont déterminés, nous allons Établir un modèle de la capacité auto-excitée et de la charge connectée à la machine. Cette Le modèle est basé sur l'ensemble de la conversion "étoile/triangle" de la capacité de charge. Il Permet d'éviter l'utilisation de composants symétriques et de modèles éclatés La machine est divisée en trois sous-systèmes : séquence directe, séquence inverse et séquence zéro .Il présente également Complètement indépendant des avantages du modèle de machine.

2.10.7.1. Transformation étoile-triangle :

La Figure 3-19(a) représente le système à étudier. Il est constitué d'une machine asynchrone dont le stator est connecté aux capacités d'auto-excitation et la charge R-L, triphasées équilibrées ou non, en configuration étoile sans neutre. Ce schéma peut être transformé en un montage triangle présentée sur la Figure 2-10(b) dont les éléments sont liés à ceux du schéma étoile par les relations suivantes :

$$C_{\bar{ij}} = \frac{\overline{C_i C_j}}{\overline{C_i + C_j + C_k}} ; Z_{\bar{ij}} = \frac{\overline{Z_i Z_j + Z_i Z_k + Z_j Z_k}}{\overline{Z_k}} \quad (2.93)$$

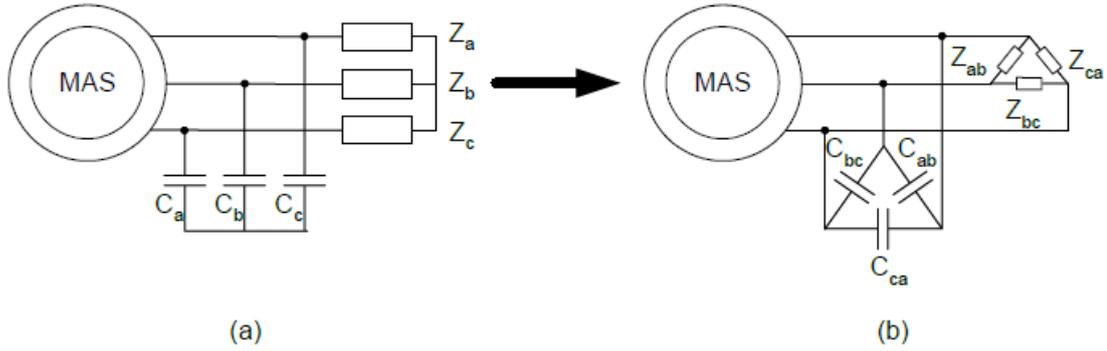


Figure 2.23 : Transformation étoile-triangle de la charge et des condensateurs d'amorçage

L'expression globale de l'impédance X_{ij} résultant de la mise en parallèle des capacités C_{ij} Et des charges Z_{ij} s'expriment alors ainsi :

$$\overline{X_{ij}} = \frac{\overline{C_{ij}} \cdot \overline{Z_{ij}}}{\overline{C_{ij}} + \overline{Z_{ij}}} \quad (2.94)$$

Avec C_{ij} : impédance du condensateur placé entre les phases i et j.

Après développement et utilisation de la variable de Laplace p, nous obtenons :

$$\overline{X_{ij}} = \frac{\frac{C_k}{p} \left(\frac{1}{C_i C_j} + \frac{1}{C_i C_k} + \frac{1}{C_j C_k} \right) \cdot (\overline{Z_i Z_j} + \overline{Z_i Z_k} + \overline{Z_j Z_k})}{\frac{\overline{Z_k} \cdot C_k}{p} \left(\frac{1}{C_i C_j} + \frac{1}{C_i C_k} + \frac{1}{C_j C_k} \right) + (\overline{Z_i Z_j} + \overline{Z_i Z_k} + \overline{Z_j Z_k})} \quad (2.95)$$

2.10.7.2. Equations de la charge :

Lors du phénomène d'auto-excitation, on a vu l'interaction entre les courants Le flux magnétique généré par la rotation du condensateur réactif et du rotor est responsable de l'auto-excitation. Afin de reproduire ce phénomène dans la simulation, il est nécessaire de reconstruire Trois tensions statoriques du courant (les variables de sortie du modèle de la figure 2-1) Et charger le modèle. La tension ainsi établie est renvoyée à l'entrée du modèle. Par conséquent, nous devons établir une équation différentielle qui relie la tension de phase à la tension neutre Courant de ligne en fonction de l'expression

de la charge. Considérez différents La tension et les différents courants sont illustrés à la **Figure 2.24**:

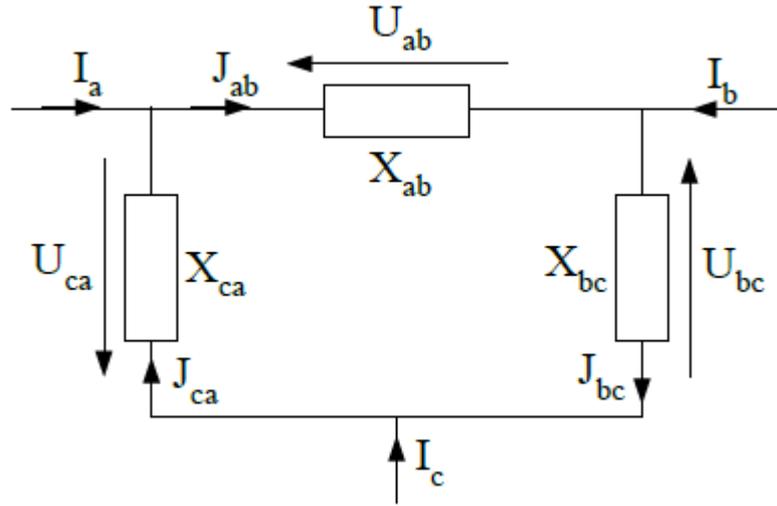


Figure 2.24 : Courants de ligne et de phase et tensions composées.

A partir de l'équation (2.95), nous avons :

$$\bar{U}_{ij} = \frac{C_k \left(\frac{1}{C_i C_j} + \frac{1}{C_i C_k} + \frac{1}{C_j C_k} \right) \cdot (\bar{Z}_i \bar{Z}_j + \bar{Z}_i \bar{Z}_k + \bar{Z}_j \bar{Z}_k)}{\frac{\bar{Z}_k C_k}{p} \left(\frac{1}{C_i C_j} + \frac{1}{C_i C_k} + \frac{1}{C_j C_k} \right) + (\bar{Z}_i \bar{Z}_j + \bar{Z}_i \bar{Z}_k + \bar{Z}_j \bar{Z}_k)} \cdot \bar{J}_{ij} \quad (2.96)$$

Soit :

$$\bar{U}_{ij} \cdot \frac{\bar{Z}_k C_k}{p} \left(\frac{1}{C_i C_j} + \frac{1}{C_i C_k} + \frac{1}{C_j C_k} \right) + (\bar{Z}_i \bar{Z}_j + \bar{Z}_i \bar{Z}_k + \bar{Z}_j \bar{Z}_k) = \frac{C_k}{p} \left(\frac{1}{C_i C_j} + \frac{1}{C_i C_k} + \frac{1}{C_j C_k} \right) \cdot (\bar{Z}_i \bar{Z}_j + \bar{Z}_i \bar{Z}_k + \bar{Z}_j \bar{Z}_k) \cdot \bar{J}_{ij} \quad (2.97)$$

Avec :

$$\bar{Z}_i = R_i + L_i p$$

$$\bar{Z}_i \bar{Z}_j = (R_i + L_i p) \cdot (R_j + L_j p) = R_i R_j + (R_i L_j + R_j L_i) p + L_i L_j p^2$$

$$(\bar{Z}_i \bar{Z}_j + \bar{Z}_i \bar{Z}_k + \bar{Z}_j \bar{Z}_k) = R_i R_j + R_i R_k + R_j R_k + (R_i L_j + R_j L_i + R_i L_k + R_k L_i + R_j L_k + R_k L_j) p + (L_i L_j + L_i L_k + L_j L_k) p^2$$

En posant :

$$RR = R_i R_j + R_i R_k + R_j R_k$$

$$RL = R_i L_j + R_j L_i + R_i L_k + R_k L_i + R_j L_k + R_k L_j$$

$$LL = L_i L_j + L_i L_k + L_j L_k$$

$$\frac{1}{CC} = \left(\frac{1}{C_i C_j} + \frac{1}{C_i C_k} + \frac{1}{C_j C_k} \right)$$

En remplaçant alors l'opérateur de Laplace par des dérivées, nous obtenons :

$$\begin{aligned}
 & U_{jk} \cdot R_i \cdot C_i \left(\frac{1}{CC} \right) + \frac{dU_{jk}}{dt} \cdot L_i \cdot C_i \left(\frac{1}{CC} \right) + \frac{dU_{jk}}{dt} \cdot RR + \frac{d^2U_{jk}}{dt^2} \cdot RL + \frac{d^3U_{jk}}{dt^3} \cdot LL = \\
 & C_i \left(\frac{1}{CC} \right) \cdot RR \cdot j_{jk} + C_i \left(\frac{1}{CC} \right) \cdot RL \cdot \frac{dj_{jk}}{dt} + C_i \left(\frac{1}{CC} \right) \cdot LL \cdot \frac{d^2j_{jk}}{dt^2}
 \end{aligned} \tag{2.98}$$

D'où l'équation différentielle de la charge :

$$\begin{aligned}
 \frac{dU_{\bar{y}}}{dt} = & - \left(\frac{1}{L_k C_k \left(\frac{1}{CC} \right) + RR} \right) \cdot \left(R_k C_k \left(\frac{1}{CC} \right) U_{\bar{y}} + RL \cdot \frac{d^2U_{\bar{y}}}{dt^2} + LL \cdot \frac{d^3U_{\bar{y}}}{dt^3} \right) \\
 & + \left(\frac{1}{L_k C_k \left(\frac{1}{CC} \right) + RR} \right) \cdot \left(RR \cdot C_k \left(\frac{1}{CC} \right) \cdot j_{\bar{y}} + RL \cdot C_k \left(\frac{1}{CC} \right) \cdot \frac{dj_{\bar{y}}}{dt} + LL \cdot C_k \left(\frac{1}{CC} \right) \cdot \frac{d^2j_{\bar{y}}}{dt^2} \right)
 \end{aligned}$$

2.11. Résultats de Simulation :

Le modèle global précédemment établi nous permettra d'effectuer des évaluations de performance Et les restrictions d'utilisation des moteurs asynchrones auto-excités, afin d'utiliser C'est dans un système éolien autonome. Ces tests incluent la validation de modèles de générateurs asynchrones autonomes. Pour cela nous étudions Il y a d'abord l'auto-amorçage dans la simulation, puis l'expérimental afin de pouvoir faire Comparaison de la validation du modèle. La machine est entraînée à vide à une vitesse de 1500 tr/min. La capacité d'auto-excitation est fixée $62\mu F$.

La modélisation de la GAS avec des linéarités magnétiques mène à des résultats peu réalistes, montre l'influence de négliger l'effet de saturation dans la simulation et en particulier la tension et le courant statorique pendant le processus d'auto-excitation.

On constate que les grandeurs statorique (Vs et Is) évoluent d'une façon exponentielle et indéfinie avec des oscillations, On peut voir que la tension atteint des milliers de volts en une seconde; et le courant qui atteint rapidement des valeurs inadmissible réellement, les puissances active et réactive atteigne des valeurs qui vont vers l'infini ce qui correspond

pas à la réalité. Ce résultat obtenu ne peut pas être obtenu expérimentalement, parce que la tension du rendement de GAS est limitée par le phénomène de saturation magnétique.

- **Autoamorçage**

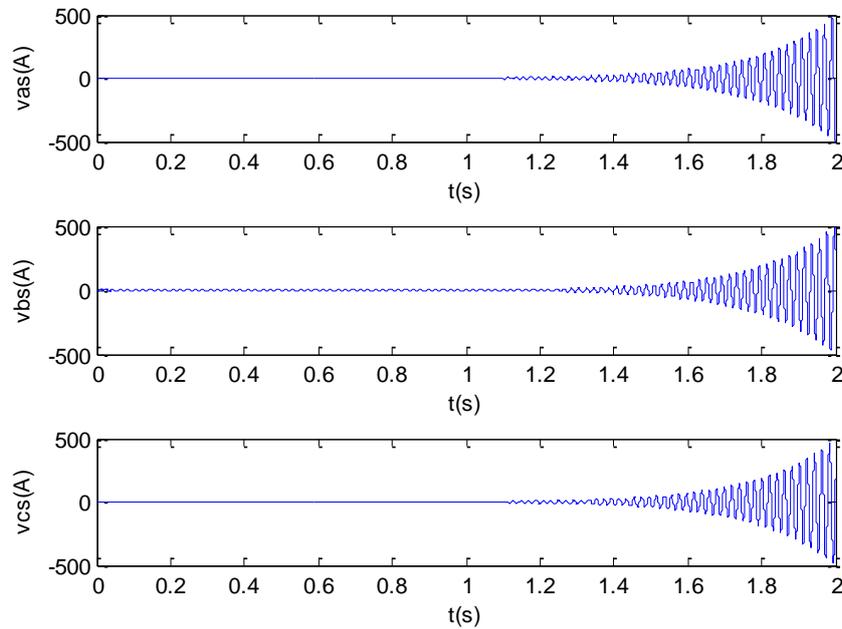


Figure 2.25 : Tension d'auto-amorçage à vide ou régime linéaire

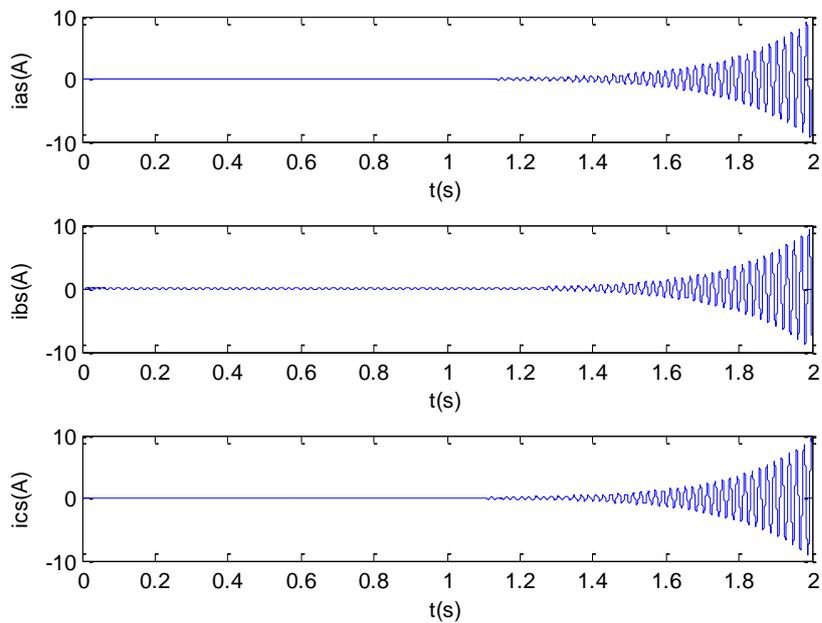


Figure 2.26 : Courant statorique induit. On régime linéaire

On constate sur la figure (2.25) que la tension induite croit, indéfiniment. De façon exponentielle avec des oscillations entretenues. Cela est dû essentiellement à l'hypothèse de non saturation du circuit magnétique de la machine.

La forme du courant de ligne (fig.2.26) est similaire à celle de la tension sauf qu'il est déphasé par rapport à elle d'un angle de 90° Le courant atteint rapidement des valeurs critiques.

Lorsque la génératrice s'amorce, son couple augmente. En effet la puissance active fournie par le moteur augmente aussi et cette augmentation est traduite par l'augmentation du courant rotorique. La figure (2.27) montre le couple de la génératrice asynchrone.

Il est évident que l'accroissement non limité des grandeurs de la machine n'est pas réel car dans le cas échéant la génératrice et son moteur d'entraînement seront détériorés immédiatement par l'accroissement du courant et du couple.

Pour se placer dans le cas réel, il faudrait tenir compte de l'effet de la saturation du circuit magnétique de la machine.

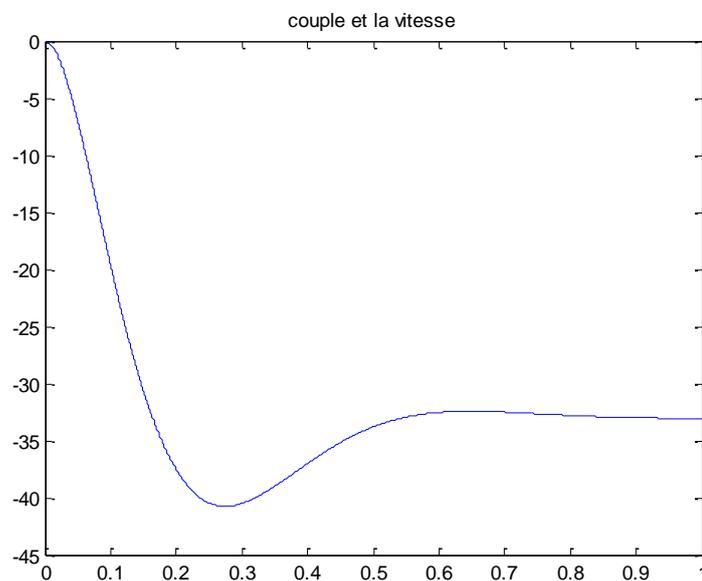


Figure 2.27 : le couple à vide ou régime linéaire

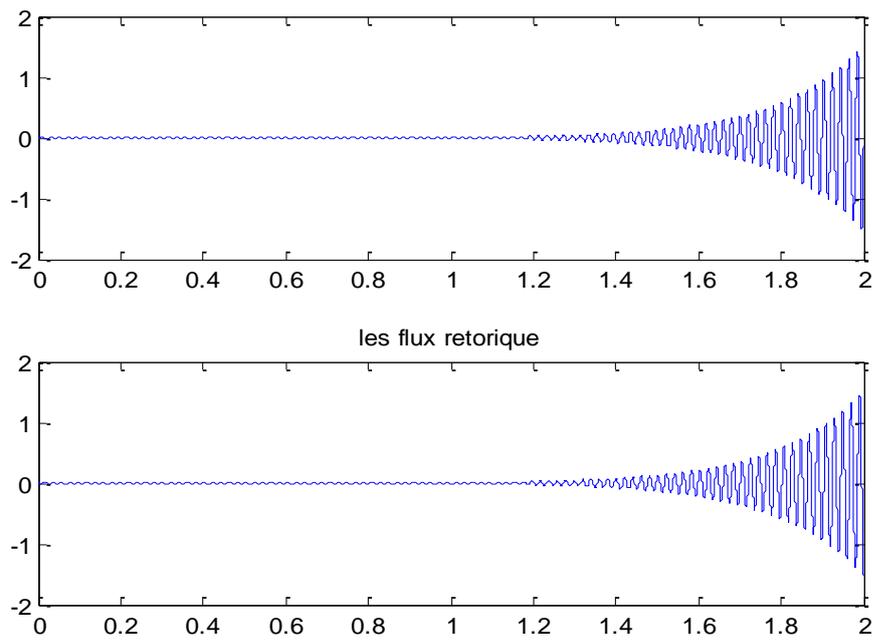


Figure 2.28 : les flux retorique à vide ou régime linéaire

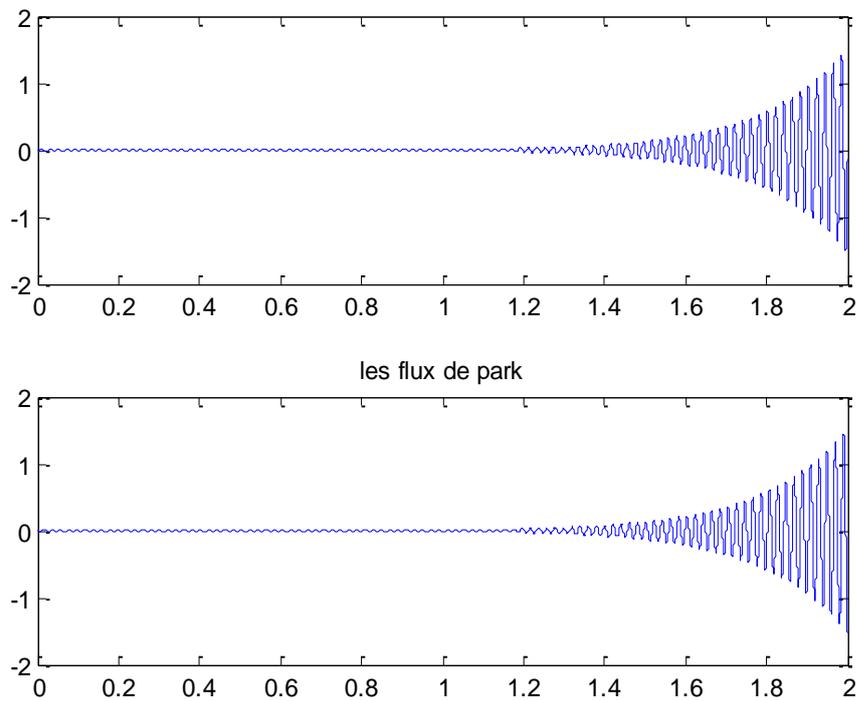


Figure 2.29 : les flux de Park à vide ou régime linéaire

2.12. Conclusion :

Dans ce chapitre, il a été présenté la modélisation et la simulation numérique de la génératrice à cage auto-excitée dans le cas d'un fonctionnement linéaire à vide et en charge. D'où les grandeurs statoriques ne sont plus imposées et il faut fournir à la machine la puissance réactive nécessaire à sa magnétisation. Les grandeurs statoriques sont directement influencées par la variation de la vitesse du rotor de l'éolienne, les capacités d'excitation, et les charges connectées à la génératrice.

Les génératrices asynchrones à cage peuvent être une des solutions pour la génération de l'énergie (électricité) en fonctionnement dans des sites isolés. Le fonctionnement de ces génératrices en charge ou à vitesse variable nuit à leurs performances. Une commande sera étudiée dans le chapitre suivant pour pouvoir contrôler la tension des enroulements statoriques.

Chapitre 3 : Modélisation de la Génératrice Asynchrone en régime de saturée

3.1. Introduction

Le modèle linéaire de la génératrice asynchrone n'est donc pas réel et le fonctionnement correct de la génératrice est redevable à la prise en compte de la saturation du circuit magnétique de la machine.

En régime de saturation, les flux et les courants ne sont plus proportionnels La caractéristique de magnétisation se compose en plus de la partie linéaire, d'une partie dite coude et une autre dite de saturation. C'est cette partie qui va limiter les grandeurs de la génératrice.

3.2. Fonctionnement à vide :

L'origine de la FEM induite est similaire à celle de l'alternateur c'est-à-dire $E = f(n. \Phi)$. Entre la FEM, E et le courant de magnétisation il existe deux relations:

- $E = f(I_m)$ Caractéristique interne;
- $E = X_c I_c = X_c I_c$, qui est une droite semblable à la droite des inducteurs dans le cas d'un générateur shunt

Le tracé de ces deux caractéristiques (fig.3.1) montre que le point de fonctionnement (régime permanent) est en A (point d'intersection des deux courbes). A chaque position du point A sur la courbe $E = f(I_m)$ correspond un certain nombre de paramètres bien fixés ($\omega s, L_m, C, g$).

La position du point A est liée à la pente de la droite: $\tan \alpha = \frac{1}{C_m} = X_c$

Lors de la variation de C, le point A se déplace sur la courbe $E = f(I_m)$; or, quand C augmente, A vient en A' et, à cet effet, la tension augmente; on peut aussi augmenter la

tension en maintenant C constant tout en augmentant la vitesse de rotation n; le point A'' vient donc en A'' (courbe en pointillé).

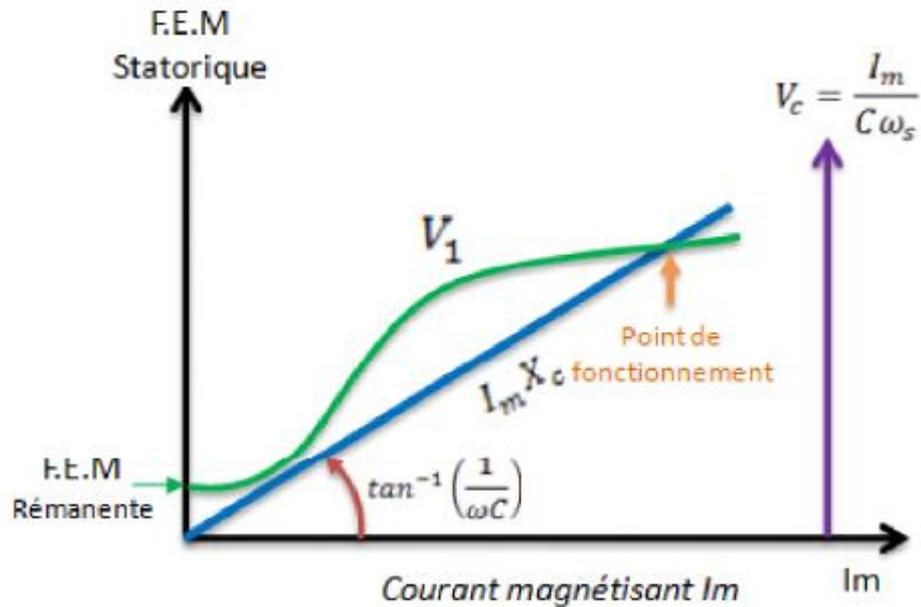


Figure 3.1 : Caractéristique de fonctionnement à vide.

Il existe une valeur de C critique qui désamorce la génératrice telle que:

$$C_r = \frac{1}{L_s \cdot \omega^2}$$

Pour cette valeur la pente $\tan \alpha_{cr} = \frac{1}{C_{cr} \cdot \omega}$ est tangente à la caractéristique interne.

3.3. Modèle diphasé de la machine asynchrone saturée

Différentes méthodes de modélisation peuvent être envisagées. Certaines d'entre elles sont plus appropriées pour décrire tel ou tel phénomène avec le meilleur compromis précision/temps de calcul. Nous trouvons dans la littérature principalement trois approches de modélisation des machines électriques :

- La modélisation par éléments finis, (très lent en calcul, mais plus précise)
- La modélisation par réseaux de préséances, (temps de calcul approprié, mais difficile de représenter l'entrefer de la machine)

- La modélisation par les circuits électriques (extension du modèle de Park, le plus adapté) : c'est ce modèle que nous allons utiliser dans ce qui suit.

Le modèle linéaire précédent est étendu pour tenir compte de la saturation. La procédure utilisée consiste à associer le phénomène de la saturation à la variation d'une inductance de magnétisation M_{st} dite statique et une autre M_{dy} dite dynamique. Ainsi, les systèmes d'équations (2-3) et (2-4) peuvent s'écrire sous la forme suivante (avec $\omega = 0$).

3.3.1 Equations de la génératrice dans le repère $\alpha.\beta$

Réécrivons le système d'équations :

$$\begin{cases} \begin{cases} -v_{\alpha s} = R_s * i_{\alpha s} - \omega_{\text{coor}} * \phi_{\beta s} + \frac{d\phi_{\alpha s}}{dt} \\ -v_{\beta s} = R_s * i_{\beta s} + \omega_{\text{coor}} * \phi_{\alpha s} + \frac{d\phi_{\beta s}}{dt} \end{cases} \\ \begin{cases} 0 = R_r * i_{\alpha r} - (\omega_{\text{coor}} - \omega) * \phi_{\beta r} + \frac{d\phi_{\alpha r}}{dt} \\ 0 = R_r * i_{\beta r} - (\omega_{\text{coor}} - \omega) * \phi_{\alpha r} + \frac{d\phi_{\beta r}}{dt} \end{cases} \end{cases} \quad (3.01)$$

La figure (4.2) représente le schéma équivalent de la GAS dans le référentiel de Park généralisé.

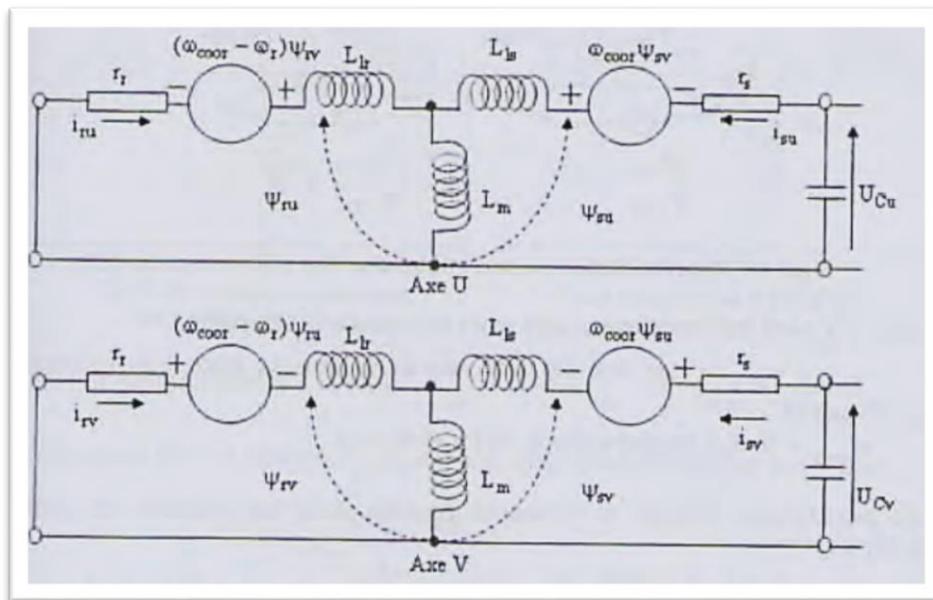


Figure .3.2 : Schéma équivalent de la GAS dans le référentiel de Park.

Les expressions des flux sont données :

$$\begin{cases} \Phi_{\alpha s} = L_s * i_{\alpha s} + L_m * i_{\alpha r} \\ \Phi_{\beta s} = L_s * i_{\beta s} + L_m * i_{\beta r} \\ \Phi_{\alpha r} = L_r * i_{\alpha r} + L_m * i_{\alpha s} \\ \Phi_{\beta r} = L_r * i_{\beta r} + L_m * i_{\beta s} \end{cases} \quad (3.02)$$

3.3.2. Représentation schématique des flux :

La figure (3.19) schématise les flux qui se manifestent suivant les axes α, β .

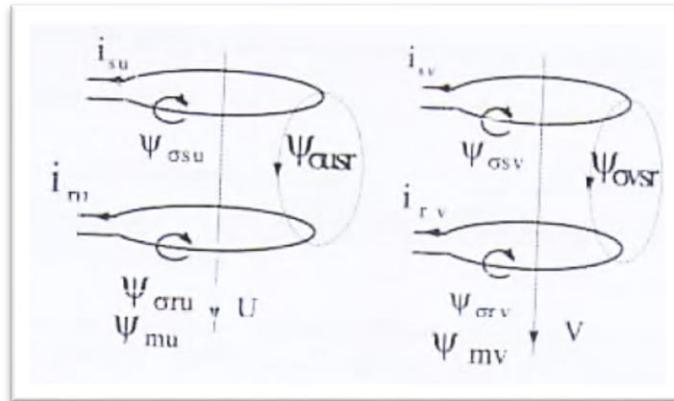


Figure 3.3 Représentation schématique des flux selon les axes α, β

Avec: Φ_{mu} - le flux principal couplé avec les deux enroulements;

$\Phi_{\sigma us} . \Phi_{\sigma ur}$; Les flux de fuite des enroulements statorique et rotorique selon l'axe U.

$\Phi_{\sigma usr}$ - le flux mutuel entre le stator et le rotor.

Les inductances propres et mutuelles figurant dans les relations du système (3.34) sont:

$$\begin{cases} L_{\alpha s} = L_{\alpha} + L_{\sigma \alpha s} + L_{\sigma \alpha sr} = L_s \\ L_{\beta s} = L_{\beta} + L_{\sigma \beta s} + L_{\sigma \beta sr} = L_s \\ L_{\alpha r} = L_{\alpha} + L_{\sigma \alpha r} + L_{\sigma \alpha sr} = L_r \\ L_{\beta r} = L_{\beta} + L_{\sigma \beta r} + L_{\sigma \beta sr} = L_r \\ l_{\alpha sr} = L_{\alpha} + L_{\sigma \alpha s} \\ l_{\beta sr} = L_{\beta} + L_{\sigma \beta r} \end{cases} \quad (3.03)$$

Prenons : $L\sigma\alpha sr = L\sigma\beta sr = 0$ ou $L\beta sr = L\beta sr = Lm$

En introduisant ces valeurs dans les expressions des flux, on obtient

$$\begin{cases} \phi_{\alpha s} = (L_{\alpha} + L\sigma_{\alpha s}) * i_{\alpha s} + L_{\alpha} * i_{\alpha r} \\ \phi_{\beta s} = (L_{\beta} + L\sigma_{\beta s}) * i_{\beta s} + L_{\beta} * i_{\beta r} \\ \phi_{\alpha r} = (L_{\alpha} + L\sigma_{\alpha r}) * i_{\alpha r} + L_{\alpha} * i_{\alpha s} \\ \phi_{\beta r} = (L_{\beta} + L\sigma_{\beta r}) * i_{\beta r} + L_{\beta} * i_{\beta s} \end{cases} \quad (3.04)$$

D' où :

$$\begin{cases} \phi_{\alpha s} = L_{\alpha}(i_{\alpha s} + i_{\alpha r}) + L\sigma_{\alpha s} * i_{\alpha s} = L_{\alpha} * i_{m\alpha} + L\sigma_{\alpha s} * i_{\alpha s} \\ \phi_{\beta s} = L_{\beta}(i_{\beta s} + i_{\beta r}) + L\sigma_{\beta s} * i_{\beta s} = L_{\beta} * i_{m\beta} + L\sigma_{\beta s} * i_{\beta s} \\ \phi_{\alpha r} = L_{\alpha}(i_{\alpha s} + i_{\alpha r}) + L\sigma_{\alpha r} * i_{\alpha r} = L_{\alpha} * i_{m\alpha} + L\sigma_{\alpha r} * i_{\alpha r} \\ \phi_{\beta r} = L_{\beta}(i_{\beta s} + i_{\beta r}) + L\sigma_{\beta r} * i_{\beta r} = L_{\beta} * i_{m\beta} + L\sigma_{\beta r} * i_{\beta r} \end{cases} \quad (3.05)$$

Ces équations sont traduites par des schémas équivalents selon les axes $\alpha ; \beta$:

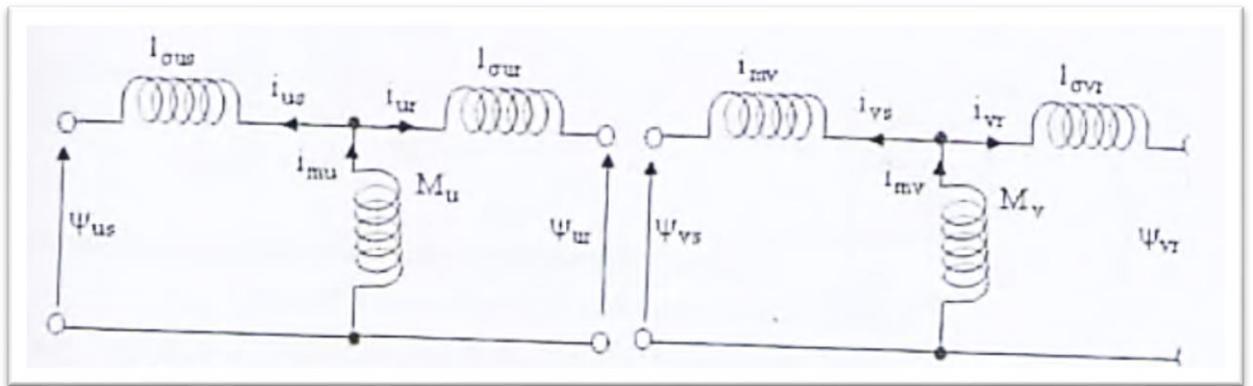


Figure 3.4 : Schéma équivalent des flux selon l'axe $\alpha ; \beta$

Prenons en considération le fait que: $L\sigma_{\alpha s} = L\sigma_{\beta s} = L\sigma$ et $i\sigma_{\beta s} = i\sigma_{\alpha s} = i\sigma_{\beta s}$

Des équations (1-31) dérivent les équations différentielles des flux suivantes:

$$\begin{cases} \frac{d\phi_{\alpha s}}{dt} = L\sigma \frac{di_{\alpha s}}{dt} + \frac{d\phi_{m\alpha}}{dt} \\ \frac{d\phi_{\beta s}}{dt} = L\sigma \frac{di_{\beta s}}{dt} + \frac{d\phi_{m\beta}}{dt} \\ \frac{d\phi_{\alpha r}}{dt} = L\sigma \frac{di_{\alpha r}}{dt} + \frac{d\phi_{m\alpha}}{dt} \\ \frac{d\phi_{\beta r}}{dt} = L\sigma \frac{di_{\beta r}}{dt} + \frac{d\phi_{m\beta}}{dt} \end{cases} \quad (3.06)$$

Ou $\phi_{m\alpha}$ et $\phi_{m\beta}$ représentent les composantes du flux magnétisant selon les axes direct et un quadratique $\alpha.\beta$ Le problème revient donc à décrire le comportement du flux magnétisant dans le système d'axes $\alpha.\beta$ pour pouvoir avoir les dérivées magnétiques $\frac{d\phi_{m\alpha}}{dt}$ et $\frac{d\phi_{m\beta}}{dt}$

Pour cela, on va décomposer le flux sur les axes $\alpha.\beta$. (La même chose pour le courant i_m); tout en supposant que le courant magnétique est en phase avec le flux magnétisant.

De cette même figure, on peut trouver les composantes du flux magnétisant :

$$\phi_{mu} = |\phi_m| \cos \beta \quad (3.07)$$

$$\phi_{mv} = |\phi_m| \sin \beta \quad (3.08)$$

Avec :

$$\cos \beta = \frac{i_{m\alpha}}{|i_m|} = \frac{\phi_{m\alpha}}{|\phi_m|} \quad (3.09)$$

$$\sin \beta = \frac{i_{m\beta}}{|i_m|} = \frac{\phi_{m\beta}}{|\phi_m|} \quad (3.10)$$

Sachant que $L_m = \frac{\phi_m}{|i_m|}$ on peut calculer :

$$\frac{d\phi_{m\alpha}}{dt} = \frac{d(L \cdot i_{m\alpha})}{dt} = \frac{dL}{dt} * i_{m\alpha} + \frac{di_{m\alpha}}{dt} * L_m \quad (3.11)$$

$$\frac{d\phi_{m\beta}}{dt} = \frac{d(L \cdot i_{m\beta})}{dt} = \frac{dL}{dt} * i_{m\beta} + \frac{di_{m\beta}}{dt} * L_m \quad (3.12)$$

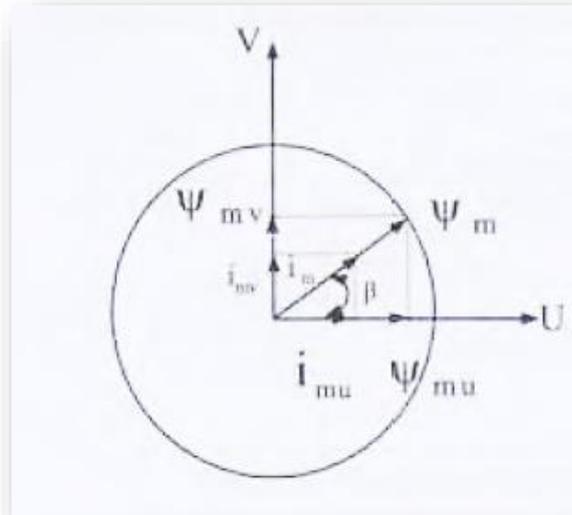


Figure 3.5 : Décomposition de flux selon les axes $\alpha\beta$.

La dérivée d'Inductance de magnétisation L peut être exprimée comme.

$$\frac{dL}{dt} = \frac{dL}{d|\bar{i}_m|} * \frac{d|\bar{i}_m|}{dt} = \frac{dL}{d|\bar{i}_m|} * \frac{1}{|\bar{i}_m|} \left(i_{m\alpha} * \frac{d i_{m\alpha}}{dt} + i_{m\beta} * \frac{d i_{m\beta}}{dt} \right) \quad (3.13)$$

Si on substitue celle équation dans les équations (3.43)-(3.44), on obtient expressions des flux telle que :

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_{m\alpha}}{dt} &= \frac{dL}{d|\bar{i}_m|} * \frac{i_{m\beta}}{|\bar{i}_m|} * \left(i_{m\mu} * \frac{d i_{m\beta}}{dt} + i_{m\beta} * \frac{d i_{m\beta}}{dt} \right) + \frac{d i_{m\alpha}}{dt} * L_m ; \\ &= \left(\frac{dL}{d|\bar{i}_m|} * \frac{i_{m\alpha}}{|\bar{i}_m|} + L \right) * \frac{d i_{m\alpha}}{dt} + \frac{dL}{d|\bar{i}_m|} * \frac{i_{m\alpha} * i_{m\beta}}{|\bar{i}_m|} * \frac{d i_{m\beta}}{dt} \end{aligned} \quad (3.14)$$

On peut montrer facilement que :

$$|\bar{i}_m| = \frac{dL}{d|\bar{i}_m|} = \frac{d\phi_m}{d|\bar{i}_m|} - L = L - l_m \quad (4.15)$$

L-la dérivée du flux magnétisant par rapport au courant magnétisant appelée inductance dynamique :

$$l_{\alpha\beta} = \frac{i_{m\mu} * i_{m\nu}}{|\bar{i}_m|} * \frac{dL}{d|\bar{i}_m|} = \frac{i_{m\mu} * i_{m\nu}}{|\bar{i}_m|} * [L - l_m] \quad (3.16)$$

$$l_{m\mu} = L + \frac{i_{m\mu}}{i_{m\nu}} l_{\alpha\beta} \quad (3.17)$$

De la même façon on arrière a :

$$l_{mv} = L + \frac{i_{mv}}{i_{mu}} l_{\alpha\beta} \quad (3.18)$$

$l_{\alpha\beta}$: L'inductance cyclique d'inter saturation:

l_{α} : L'inductance cyclique de saturation selon l'axe α ;

l_{β} : L'inductance cyclique de saturation selon l'axe β .

Les inductances cycliques totales statoriques et rotoriques selon les axes (α, β) sont:

$$\begin{cases} L_{s\alpha} = L_{m\alpha} + L_{\sigma s} \\ L_{s\beta} = L_{m\beta} + L_{\sigma s} \\ L_{r\beta} = L_{m\alpha} + L_{\sigma r} \\ L_{r\alpha} = L_{m\alpha} + L_{\sigma r} \end{cases} \quad (3.19)$$

Dans le cas linéaire, (de non saturation), on $l_{uv} = \mathbf{0}$ et $l_{mu} = l_{mv} = L$.

Les inductances cycliques de saturation dans le référentiel (α, β) sont exprimées par :

$$l_{m\alpha} = L + \frac{i_{m\alpha}}{i_{m\beta}} l_{\alpha\beta} = L \cos U^2 + L \sin U^2 \quad (3.20)$$

$$l_{m\beta} = L + \frac{i_{m\alpha}}{i_{m\beta}} l_{\alpha\beta} = L \cos U^2 + L \sin U^2 \quad (3.21)$$

Avec :

$$\cos \alpha = \frac{i_{m\alpha}}{|i_m|}$$

$$\sin \alpha = \frac{i_{m\alpha}}{|i_m|}$$

L'inductance cyclique d'intersection :

$$l_{\alpha\beta} = \frac{i_{m\alpha} * i_{m\beta}}{|i_m|} * \frac{dL_m}{d|i_m|} = \frac{i_{m\alpha} * i_{m\beta}}{|i_m|^2} (L - L_m) \quad (3.22)$$

Avec L L'inductance dynamique donnée par la rotation suivent : $L = \frac{d|\overline{\phi}_m|}{d|i_m|}$

Et L_m l'inductance magnétique donne par : $L_m = \frac{d|\overline{\phi}_m|}{d|i_m|}$

A partir de la conduction magnétique l_m air, il résulte que :

$$l_{\alpha\beta} = 0, \quad l_{m\alpha} = l_m \quad l_{s\alpha} = l_{s\beta}, \quad l_{r\alpha} = l_{r\beta}$$

L'expression du courant de magnétisation :

$$i_m = \sqrt{(i_{\alpha s} + i_{\alpha r})^2 + (i_{\beta s} + i_{\beta r})^2} \quad (3.23)$$

En remplaçant les quantité de flux trouvées dans le système d'équation et après tout calcul fait , on obtient le nouveau system d'équation qui tient compte de la saturation du circuit magnétique de la machine . Le référentiel est lie au stator $\omega_{coor} = 0$.

$$\begin{cases} -U_{\alpha s} = r_s * i_{\alpha s} + l_{\sigma s} \frac{di_{\alpha s}}{dt} + l_{m\alpha} \frac{di_{\alpha s}}{dt} + l_{m\alpha} \frac{di_{\alpha r}}{dt} + l_{\alpha\beta} \frac{di_{\beta s}}{dt} + l_{\alpha\beta} \frac{di_{\beta r}}{dt} \\ -U_{\beta s} = r_s * i_{\beta s} + l_{\sigma s} \frac{di_{\beta s}}{dt} + l_{m\beta} \frac{di_{\beta r}}{dt} + l_{m\beta} \frac{di_{\beta s}}{dt} + l_{\alpha\beta} \frac{di_{\alpha s}}{dt} + l_{\alpha\beta} \frac{di_{\alpha r}}{dt} \\ 0 = r_r * i_{\alpha r} + l_{\sigma r} \frac{di_{\alpha r}}{dt} + l_{m\alpha} \frac{di_{\alpha r}}{dt} + l_{m\alpha} \frac{di_{\alpha s}}{dt} + l_{\alpha\beta} \frac{di_{\beta s}}{dt} + l_{\alpha\beta} \frac{di_{\beta r}}{dt} + \omega_r(L_r * i_{\beta r} + L_i \beta s) \\ 0 = r_r * i_{\beta r} + l_{\sigma r} \frac{di_{\beta r}}{dt} + l_{m\beta} \frac{di_{\beta r}}{dt} + l_{m\beta} \frac{di_{\beta s}}{dt} + l_{\alpha\beta} \frac{di_{\alpha s}}{dt} + l_{\alpha\beta} \frac{di_{\alpha r}}{dt} - \omega_r(L_r * i_{\alpha r} + L_i \alpha s) \end{cases} \quad (3.24)$$

3.4. Détermination des inductances saturables équivalentes

Les inductances de magnétisation saturables statique et dynamique sont calculées à partir de la caractéristique de magnétisation de la machine, qui peut être relevée par un essai à vide ou au synchronisme :

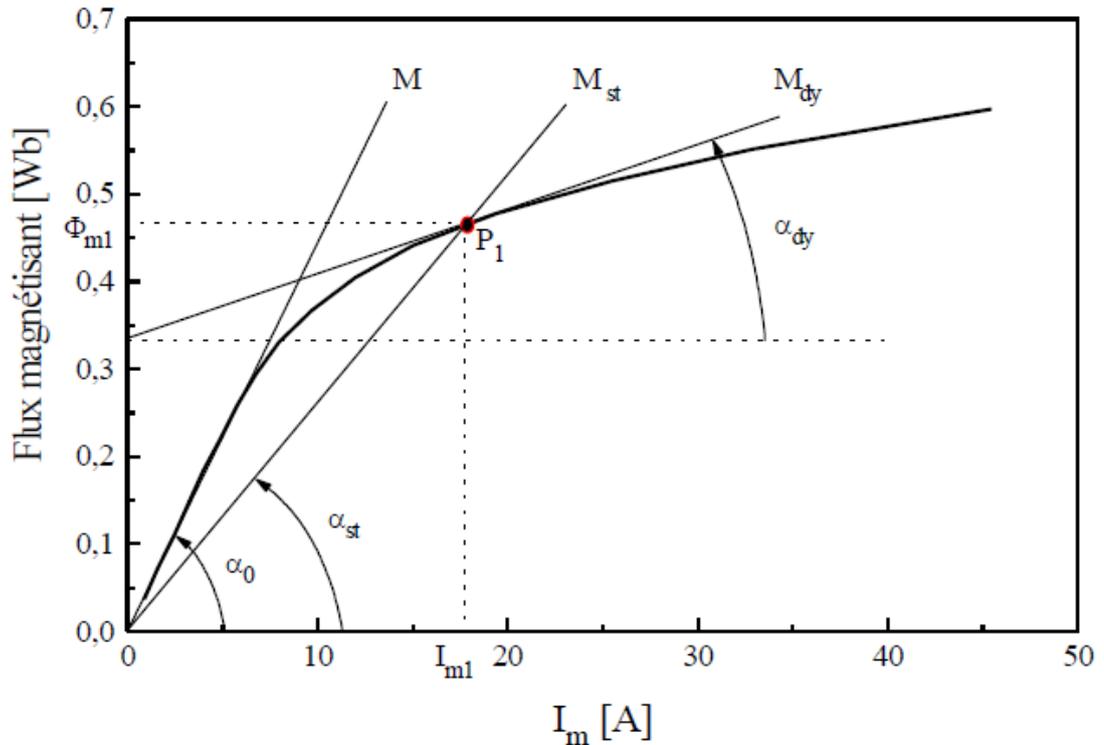


Figure 3.6 : Caractéristique de magnétisation de la machine

A partir de ces caractéristiques trois valeurs de l'inductance de magnétisation peuvent être définies :

- L'inductance de magnétisation non saturée M :

$$M = tg(\alpha_0)$$

Elle correspondant à la caractéristique de l'entrefer de la machine

- L'inductance de magnétisation statique (ou de régime permanent) M_{st} . Elle est définie pour chaque point de fonctionnement p1 par:

$$M_{st} = \frac{\Delta\phi_m}{\Delta I_m} \Big|_{p1} = \frac{\phi_{m1}}{I_{m1}} = tg(\alpha_{st}) \quad (3.25)$$

- L'inductance de magnétisation dynamique (ou transitoire) M_{dy} :

$$M_{dy} = \frac{d\phi_m}{dI_m} \Big|_{p1} = tg(\alpha_{dy}) \quad (3.26)$$

C'est la tangente à la courbe de magnétisation au point de fonctionnement p1. Dans le cas où la saturation est négligée, il vient alors: $M_{st} = M_{dy} = M$.

$$\begin{cases} L\alpha = \frac{d\phi_m}{dim} + \sin(\theta)^2 \left(\frac{\phi_m}{im} - \frac{d\phi_m}{dim} \right) \\ L\beta = \frac{d\phi_m}{dim} + \cos(\theta)^2 \left(\frac{\phi_m}{im} - \frac{d\phi_m}{dim} \right) \\ L\alpha = \left(\frac{\phi_m}{im} - \frac{d\phi_m}{dim} \right) \sin(\theta) \cos(\theta) \end{cases} \quad (3.27)$$

Et en utilisant ces nouvelles expressions pour les inductances, le système d'équation devient :

$$\begin{cases} \begin{cases} -v\alpha s = R_s * i\alpha s + L\sigma s \frac{di\alpha s}{dt} + L\alpha \frac{dim\alpha}{dt} \\ -v\beta s = R_s * i\beta s + L\sigma s \frac{di\beta s}{dt} + L\alpha \frac{dim\beta}{dt} \end{cases} \\ 0 = R_r * i\alpha r + L\sigma r \frac{di\alpha r}{dt} + L\alpha \frac{dim\alpha}{dt} + \omega(M_{st} + L\sigma s)i\beta r \\ 0 = R_r * i\beta r + L\sigma r \frac{di\alpha*\beta r}{dt} + L\alpha \frac{dim\beta}{dt} + \omega(M_{st} + L\sigma r)i\alpha r \end{cases} \quad (3.28)$$

Les deux mutuelles sont déterminées à partir de la courbe de magnétisation qui est modélisée par une fonction mathématique correspondante. Cette dernière doit être fiable pour tous les points de la caractéristique de magnétisation, et notamment pour ceux qui se situent dans la zone de forte saturation. On peut citer quelques expressions mathématiques qui reproduisent la relation entre le courant et le flux :

$$\begin{aligned}\phi(I) &= a.f_n(I) + \mu_0 I \quad \text{où } f_n(I) = [1 - \exp(-x^n)]^{\frac{1}{n}} \\ \phi(I) &= \sum_{k=0}^{\infty} c_k I^k \\ \phi(I) &= \frac{aI}{b + |I|} + cI \\ \phi(I) &= \text{arctg}(bI) + cI\end{aligned}$$

Et on a aussi :

$$\begin{aligned}I(\phi) &= a.\sinh(b\phi) + c\phi \\ I(\phi) &= \sum_{k=0}^p a_k \phi^{2k+1} \\ I(\phi) &= a\phi^{2m+1} + c\phi \quad \text{où } (m \text{ entier } \geq 1) \\ \phi(I) &= [M_s + (M_0 - M_s) \exp(-BI^2)] I\end{aligned}$$

Pour notre caractéristique magnétique relevée, nous adoptons l'approximation suivante :

$$\phi(I) = 0.63 \text{arctg}(0.15 I_m)$$

Ce qui permet de déterminer les deux mutuelles :

$$M_{st} = \begin{cases} 0.09H, \text{ si } : I_m < 3A \\ \frac{0.63 \text{arctg}(0.15 I_m)}{I_m} H, \text{ si } : I_m \geq 3A \end{cases}$$

$$M_{dy} = \frac{37.8}{9I_m^2 + 400}$$

Lors de la simulation numérique, ces deux inductances doivent être ajustées en relation avec le courant magnétisant pour chaque itération de calcul.

La figure 4-8 représente le résultat de l'approximation de la caractéristique de magnétisation obtenue à partir du relevé expérimental :

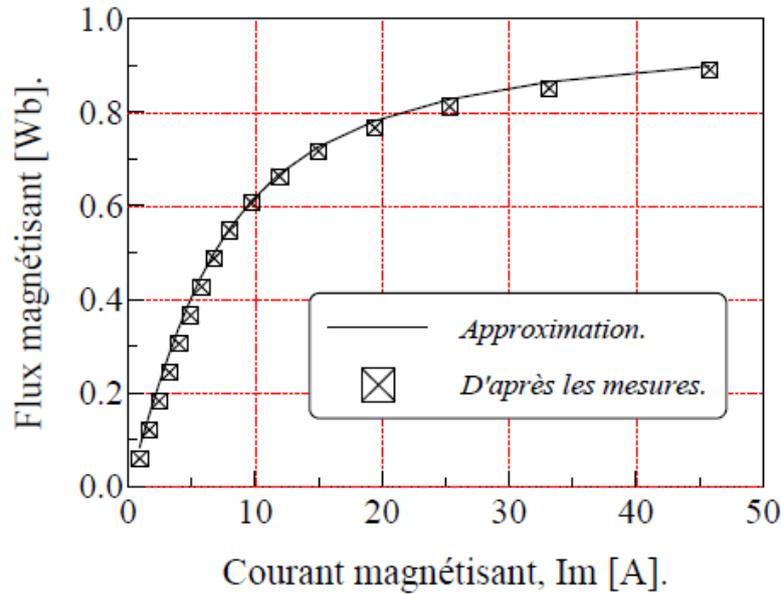


Figure 3.7 : Approximation mathématique de la caractéristique de magnétisation.

3.5. Mise sous forme d'état du modelé biphasé

En mettant le système d'équation sous forme compacte on aura :

$$[V] = [A][I] + \omega[C][I] + [\dot{I}]$$

$$[V] = \begin{bmatrix} -v_{as} \\ -v_{bs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; [I] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{ar} \\ i_{br} \end{bmatrix}; [A] = \text{diag} \begin{bmatrix} r_s \\ r_s \\ r_r \\ r_r \end{bmatrix};$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_m & 0 & l_r \\ -l_m & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix};$$

$$[L] = \begin{bmatrix} l_{\alpha s} & l_{\beta s} & l_{m\alpha} & l_{\alpha\beta} \\ l_{\alpha\beta} & l_{\beta s} & l_{\alpha\beta} & l_{m\beta} \\ l_{\alpha m} & l_{\alpha\beta} & l_{\alpha r} & l_{\alpha\beta} \\ l_{\alpha\beta} & l_{m\beta} & l_{\alpha\beta} & l_{\beta r} \end{bmatrix}$$

En mettant sous forme d'état on trouve :

$$[\dot{I}] = [L]^{-1}\{[V] - [A][I] - \omega[C][I]\} \quad (3.29)$$

Afin de compléter la relation on doit ajouter l'expression du couple électromagnétique suivante :

$$C_e = \frac{3}{2} P_m (i_{\beta s} * i_{\alpha r} - i_{\alpha s} * i_{\beta r}) \quad (3.30)$$

Et celle de la vitesse rotorique dynamique :

$$\frac{j}{P} \frac{d\omega r}{dt} = C_m - C_e - F\Omega. \quad (3.31)$$

3.6. Résultats de simulation et interprétations

Dans ce qui suit, nous validerons le modèle saturé non linéaire dans différentes Configurations de fonctionnement de la génératrice autonome.

- **Etude de l'auto-amorçage à vide :**

Le fonctionnement étudié correspondant à une valeur de capacité d'excitation ($C=63\mu\text{F}$) et le rotor de la machine est entraîné à ($n=1500\text{tr/min}$).

Les figures suivantes ci-dessous montrent les résultats de la simulation du processus de L'auto-amorçage à vide d'une génératrice asynchrone en régime saturée.

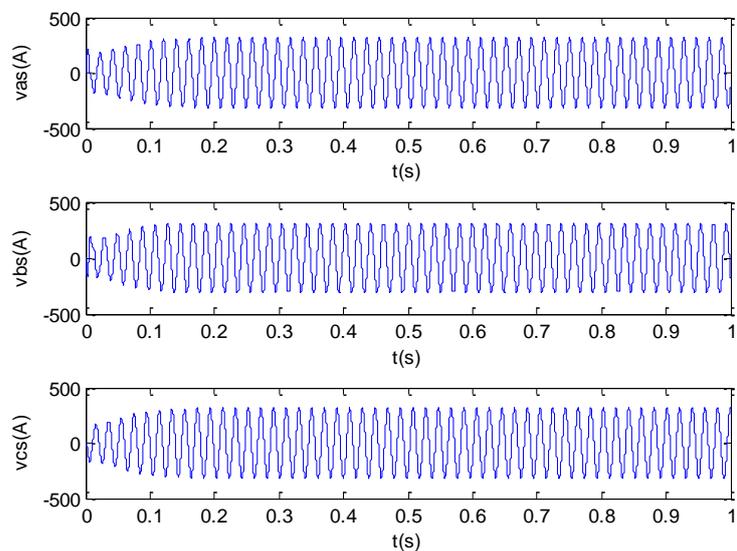


Figure 3.8 : Tension d'auto-amorçage à vide dans régime saturation

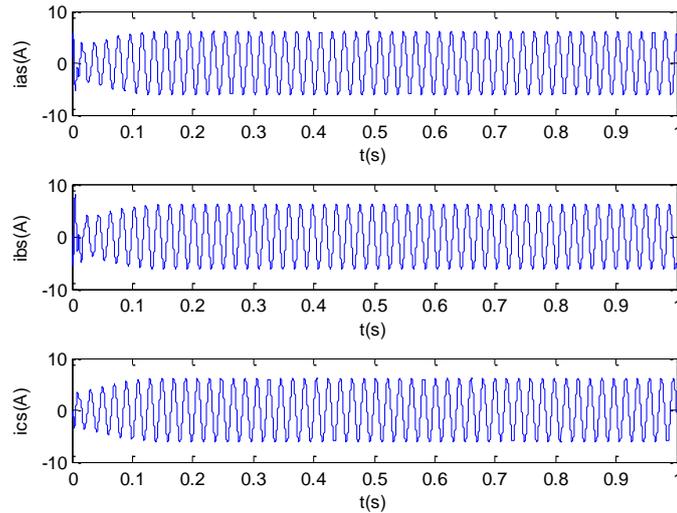


Figure 3.9 : Courant d’auto-amorçage à vide dans régime saturation

Les figures (4.9) et (4.10) représentent respectivement l'évolution de la tension et du courant statoriques en fonctionnement à vide de la génératrice asynchrone à cage. Au démarrage, la tension et le courant générés croissent d'une façon exponentielle, puis se stabilisent respectivement à 300V et à 10A en régimes totalement établis à $t=0.9s$, et c'est l'instant où le courant de magnétisation atteint son régime saturé figure (4.11).

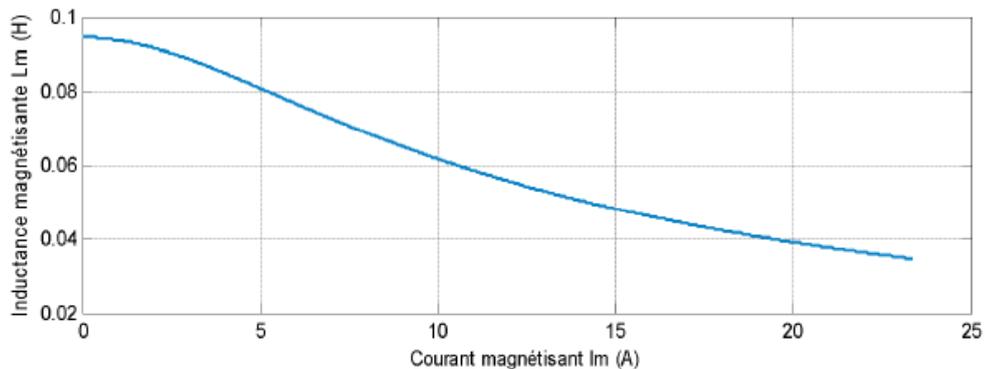


Figure 3.10 : variation d’inductance magnétique en fonction courant magnétique

L'allure du courant de magnétisation donnée dans la figure (4.11), montre que la tension et le courant dans leurs évolutions suivent la forme du courant de magnétisation. La figure (4.12) représente l'allure de l'inductance de magnétisation qui, comme on pouvait le prévoir, varie dans le temps en fonction de l'amplitude des courants.

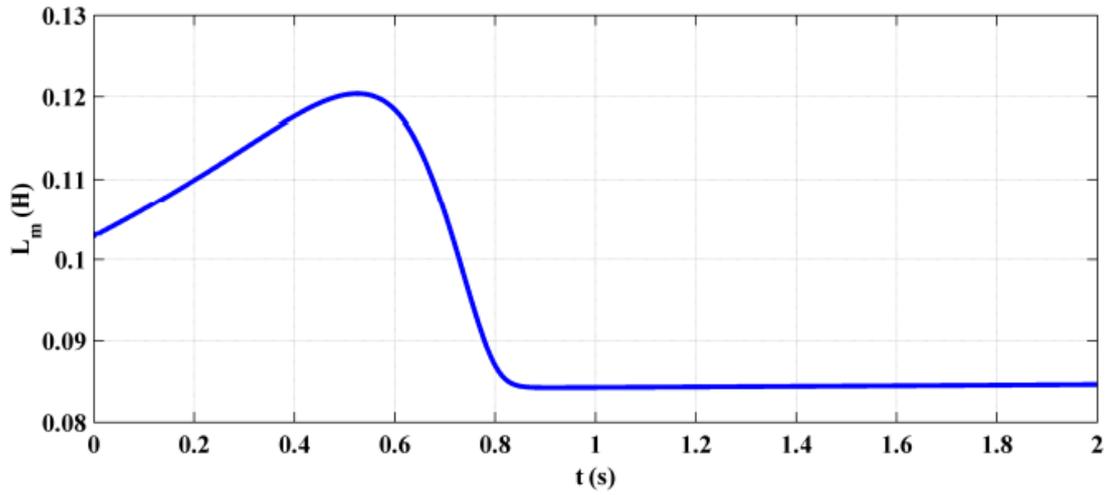


Figure 3.11 : Simulation de l'évolution de l'inductance mutuelle.

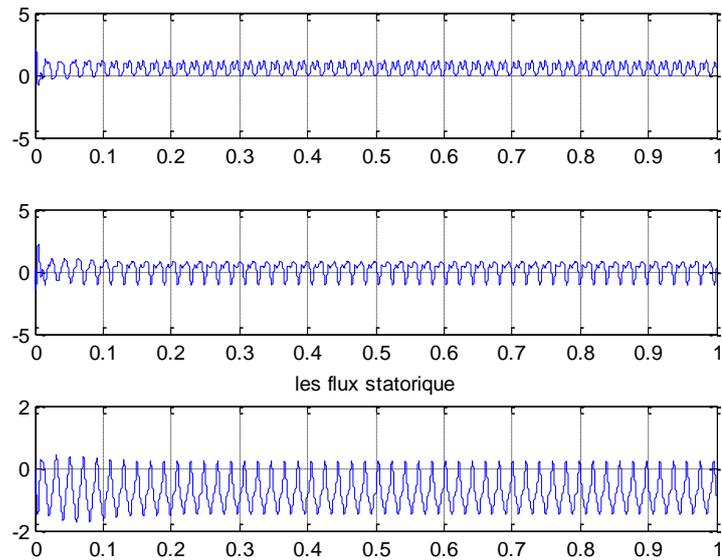


Figure 3.12 : le flux statorique dans régime saturation

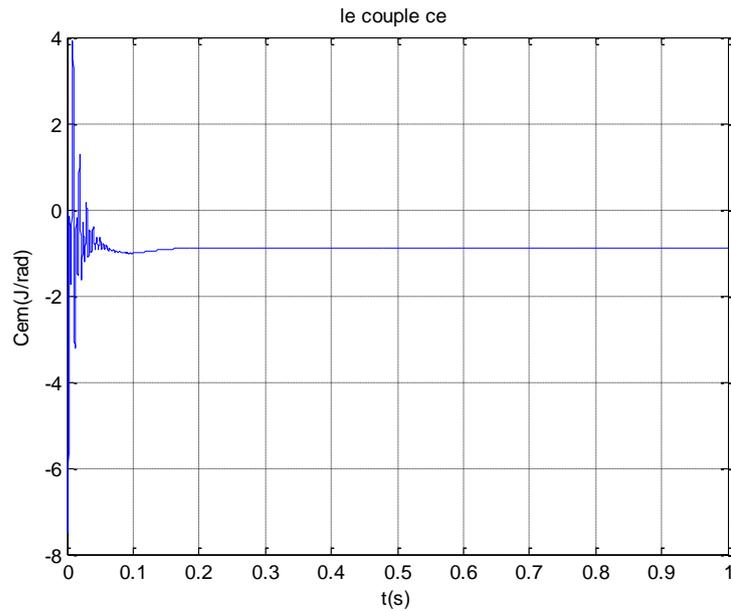


Figure 3.13 : le couple statorique dans régime saturation

7. Conclusion :

Nous avons présenté la procédure de prise en compte de l'effet de la saturation magnétique du circuit du flux principal de la machine en régime dynamique. Dans la partie „simulation et résultats expérimentaux“ (plus bas) nous allons voir que les résultats obtenus à partir du modèle saturé de la machine, sont concordants avec ceux issus de l'expérimentation. Cependant, notons que pour les très fortes intensités, une différence apparaît malgré la prise en compte de la saturation. Celle-ci peut être attribuée à la saturation des circuits des flux de fuite non considérée dans la présente modélisation, mais plus on tient compte de nouveaux phénomènes plus la modélisation devient compliquée et la méthode inadaptée.

CONCLUSION GENERALE

Le travail effectué dans cette thèse a comme objectif la modélisation des différents composants de la production décentralisée de l'énergie éolienne et l'étude génératrices asynchrones a cage auto-excitation avec doux régime (linaire, saturation).

Au début, Nous avons abordés tout d'abord l'étude, la conception et la modélisation de la turbine éolienne car elle constitue un élément fondamental dans la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Bien que beaucoup de gens croient qu'une éolienne, c'est de la mécanique. Pourtant, les éoliennes sont aussi et surtout des machines électriques, et les défis techniques ou les coûts de réalisation d'une éolienne résident surtout désormais dans ce domaine de l'électricité et de l'électronique de puissance. D'ailleurs, il vaudrait mieux parler de "centrale éolienne", c'est à dire de l'ensemble des composants qui vous permettent de produire de l'électricité, la "turbine" n'étant qu'une partie de cet ensemble, Eude et fonctionnement dynamique de la machine asynchrone et les éléments constituant une machine asynchrone .

Par la suite nous avons étudié la détermination des capacités d'auto-amorçage d'une génératrice asynchrone autonome en fonctionnement linéaire que nous avons étudié le comportement de la génératrice lors du retour réseau à travers les équations électriques et de flux. Durant la simulation analyse de program MATLAB.

Le troisième chapitre, est consacré à l'analyse des performance de génératrice asynchrone a cage avec saturation .Une modélisation originale nous a permis de simuler son comportement en régime équilibré de confronter les résultats à des validations expérimentales. Cette confrontation nous a permis de mettre l'accent sur l'importance de la saturation magnétique de la machine. En effet, la simulation du phénomène d'auto-excitation nécessite la prise en compte de cette saturation par une inductance

magnétisante variable en fonction du courant magnétisant. La précision de cette variation implique une méthode d'identification rigoureuse de la courbe de magnétisation.

Le présent projet consiste donc à concevoir un système de régulation qui permet de maintenir constantes l'amplitude et la fréquence de la tension générée par une génératrice asynchrone (GAS) avec rotor à cage d'écureuil utilisé dans un système de production d'énergie de faible puissance. La puissance active consommée, la puissance réactive de la charge et la puissance produite sont variables et. Le système est parfaitement autonome, c'est-à-dire que la puissance réactive nécessaire afin d'exciter la génératrice est fournie par le système. De plus, le système de production d'énergie est isolé du réseau électrique. Enfin, bien qu'il soit question de système éolien de production d'énergie, ce projet est généralisé afin que la solution apportée soit également valide pour d'autres types de système de production d'énergie. Il pourra donc être appliqué à un système hydroélectrique par exemple.

Je conseille à la prochaine génération pour développer cette recherche, Régulation de la tension et de la fréquence. Modèle dynamique de la génératrice asynchrone, Conception d'un contrôleur et aussi travaille le même thème avec le programme de FLUX2D.

Finalement, je trouve un résultat que Le modèle linéaire de la génératrice asynchrone n'est donc pas réel et le fonctionnement correct de la génératrice est à la prise en compte de la saturation du circuit magnétique de la machine.

En régime de saturation, les flux et les courants ne sont plus proportionnels. La caractéristique de magnétisation se compose en plus de la partie linéaire, d'une partie dite coude et une autre dite de saturation. C'est cette partie qui va limiter les grandeurs de la génératrice.

1. Paramètres de la Génératrice Asynchrone à Cage

Couple nominal : $3000 / (1415 \cdot 2 \cdot \pi / 60)$

Résistance statorique : 1.84Ω

Résistance rotorique : 1.84Ω

Inductance de fuite statorique : $0.17 H$

Inductance de fuite rotorique : $0.17 H$

Inductance de fuite mutuelle : $0.16H$

Moment d'inertie : $0.0154 kg \cdot m^2$

Coefficient de frottement : $0.0038 N \cdot m \cdot s / rad$

Fréquence nominale : $50HAZ$

Nombre de paires de pôles : 2

Condensateur : $62\mu F$

2. Outils de simulation MATLAB :

Un système interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique, destiné aux ingénieurs et scientifiques. Il possède un langage de programmation à la fois puissant et simple d'utilisation. Il permet d'exprimer les problèmes et solutions d'une façon aisée, contrairement à d'autres langages de programmation. Il intègre des fonctions d'analyse numérique, de calcul matriciel, de traitement de signal, de visualisation graphique 2D et 3D, etc. Il peut être utilisé de façon interactive ou en mode programmation. En mode interactif, l'utilisateur à la

possibilité de réaliser rapidement des calculs sophistiqués et d'en présenter les résultats sous forme numérique ou graphique. En mode programmation, il est possible d'écrire des scripts (programmes) comme avec d'autres langages. L'utilisateur peut aussi créer ses propres fonctions pouvant être appelées de façon interactive ou par des scripts. Ces fonctions fournissent à MATLAB un atout inégalable : son extensibilité. Ainsi, l'environnement MATLAB peut facilement être étendu. Dans MATLAB, l'élément de base est la matrice. L'utilisateur ne s'occupe pas des allocations de mémoire ou de redimensionnement comme dans les langages classiques. Les problèmes numériques peuvent être résolus en un temps record, qui ne représente qu'une infime partie du temps à passer avec d'autres langages comme le Basic, C, C++ ou le Fortran. MATLAB s'est imposé dans les milieux universitaire et industriel comme un outil puissant de modélisation, de simulation et de visualisation de problèmes numériques. Dans le monde universitaire, MATLAB est utilisé pour l'enseignement de l'algèbre linéaire, le traitement du signal, l'automatique, etc., ainsi que dans la recherche scientifique. Dans le domaine industriel, il est utilisé pour la résolution et la simulation de problèmes d'ingénierie et de prototypage. MATLAB est une abréviation de MATrix LABoratory. Écrit à l'origine, en Fortran, par Cleve Moler, MATLAB était destiné à faciliter l'accès au logiciel matriciel développé dans les projets LINPACK et EISPACK. La version actuelle est écrite en C. Sa disponibilité est assurée sur plusieurs plates-formes : Sun, Bull, HP, IBM, Compatibles PC, Macintosh, et plusieurs machines parallèles. MATLAB est conforté par une multitude de boîtes à outils (toolboxes) spécifiques à des domaines variés. Un autre atout de MATLAB, est sa portabilité; la même portion de code peut être utilisée sur différentes plates-formes sans la moindre modification.



Fig1 : ligne de Matlab



Fig2 : ligne de simulation

3. Principe de la méthode d'Euler :

Etant donné une équation différentielle :

$$\frac{dx}{dt} = f(t, x) \quad (1)$$

On veut approximer, pour une valeur initiale x_0 , une fonction $x(t)$ qui vérifie l'équation et pour laquelle $x(0) = x_0$ pour faire cela, on choisit quelques points t_i pour lesquels on calcule des approximations x_i correspondants. On espère que $x_i = x(t_i)$. A partir de la valeur x_0 on peut calculer $\frac{dx}{dt}(0) = x_0'(0)$ à l'aide de l'équation (1) en calculant $f(0, x_0)$. Comme valeur approximative x_1 au temps

$t_1 = 0 + \Delta t$ On choisit de prendre :

$$x_0 + dx = x_0 + x_0' \cdot \Delta t \quad (2)$$

En général, la valeur x_{i+1} est déterminée en ajoutant $\Delta x_i = (\Delta t) \cdot f(t_i, x_i)$ à son prédécesseur, la valeur x_i :

$$x_{i+1} = x_i + (\Delta t) \cdot f(t_i, x_i) \quad (3)$$

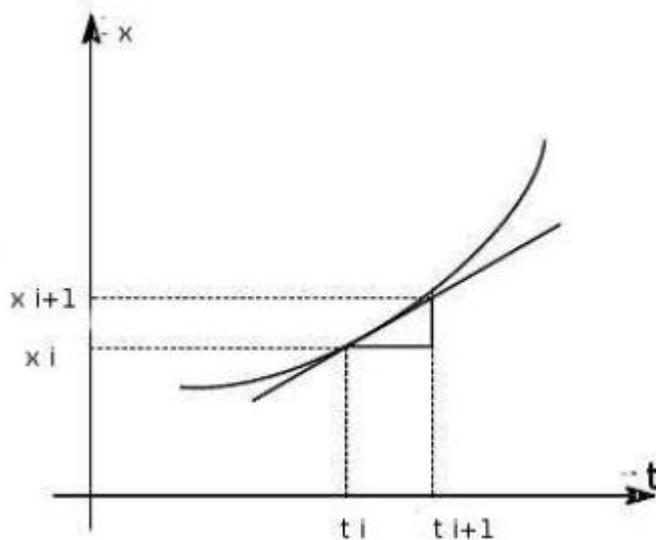


Fig. 1 – Pour approximer la courbe, on suit la droite tangente à cette courbe. La tangente est donnée par le point x_i et le coefficient directeur $x'(t) = f(t_i, x(t_i))$, Cette

procédure est justifiée par les approximations suivantes. La dérivée $x'(t)$ peut être vue comme le quotient de deux différences (pour Δt petit) :

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_{i+1} - x_i}{t_{i+1} - t_i} \approx x'(t_i) \quad (4)$$

Où la dérivée inconnue $x'(t)$ de la fonction $x(t)$ - qu'on ne connaît pas non plus - est remplacée par $f(t, x)$ correspondant à (1). Cela donne la spécification (3).

Bibliographie

- [1] P.W. Carlin, A.S. Laxson, E.B. Muljadi, "The History and State of Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology", NREL/TP-500-28607, Février 2001.
- [2] J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [3] Site Internet de l'Association Danoise de l'Industrie Eolienne, "<http://www.windpower.org/fr/core.htm>".
- [4] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, "Eoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 1 - BM 4 640 21.
- [5] O. De Vries, "On the theory of the horizontal axis wind turbine", Ann. Rev. Fluid. Mech. 1983, 15, pp. 77-96.
- [6] J.L. Menet, L.-C. Valdès, B. Ménart, "A comparative calculation of the wind turbines capacities on the basis of the L- σ criterion", Renewable Energy 22, 2001, pp. 491-506.
- [7] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [8] P. Berlu, "Calcul des Efforts Subis par les Eoliennes de Moyenne et Forte Puissance", Thèse de Doctorat, Université des sciences et Technologies de Lille I, 1999.
- [9] A. D. Diop, "Contribution au Développement d'un Simulateur Electromécanique d'Aérogénérateurs : Simulation et Commande en Temps Réel d'une Turbine de Puissance Moyenne à Angle de Calage Variable", Thèse de doctorat, Université du Havre, 8 juillet 1999.
- [10] J. Ancel, "Machines Asynchrones, Fonctionnement et Calcul", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie électrique, D 451-9, D3II.

- [11] : Rachide abdessemed :modélisation et simulation des machines électrique ,[texte imprimé]/2001.
- [12] Matlab-Simulink, Version 7.0.
- [13] S. El Aimani, '*Modélisation de Générateurs Eoliens à Vitesse Variable Connectés à un Bus Commun*', Forum International sur les Energies Renouvelables, Tétouan, Maroc, pp. 356 – 362, 2002.
- [14] Sejir Khojet El Khil, '*Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA)*', Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Décembre 2006.
- [15] A. Mirecki, '*Etude Comparative de Chaînes de Conversion d'Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance*', Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Avril 2005.
- [16] D. Aguglia, P. Viarouge, R. Wamkeue and J. Cros, '*Determination of Fault Operation Dynamical Constraints for the Design of Wind Turbine DFIG Drives*', Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 81, N°2, pp. 252 – 262, 2010.
- [15] T. Grinoux, R. Gibert, P. Neau and C. Buthion, '*Eoliennes en Milieu Urbain – Etat de l'Art*', pp. 1 – 129, 2006.
- [17] S. El Aimani, '*Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension*', Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille et Université des Sciences et Technologies de Lille 1, Décembre 2004.
- [18] H. Camblong, '*Minimisation de l'Impact des Perturbations d'Origine Eolienne dans la Génération d'Electricité par des Aérogénérateurs à Vitesse Variable*', Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, Décembre 2003.
- [19] M. Malinowski, '*Sensorless Control Strategies for Three - Phase PWM Rectifiers*', PhD Thesis, Warsaw University of Technology, Institute of Control and Industrial Electronics, 2001.

- [20] M. Malinowski and M.P. Kazmierkowski, 'Simulation Study of Virtual Flux Direct for Three-Phase PWM Rectifiers', 26th Annual Conference of the IEEE; Industrial Electronics Society, INCON, Vol. 4, pp. 2620 – 2625, 2000.
- [20] Hind Djeghloud, 'Filtrage Actif de Puissance', Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine, 2007.
- [21] S. Belakehal, 'Conception et Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables', Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine, 2010.
- [22] Barnes D. et Qian L., 1992, «Urban Interfuel Substitution, Energy Use and Equity in developing countries: Some Preliminary Results », in Dorian J.P et Fesharaki F. (Eds), International Issues in Energy Policy, *Development, and Economics*, Westview Press.
- [23] Bentaleb N, 2001, *Evaluation de la plate-forme multifonctionnelle EDF dans la région de Kayes (Mali)*, Rapport de mission au Mali pour le compte d'EDF en mars- avril 2001.
- [24] Benallou A. et Rodot M. (sous la Direction), 2002, *Photovoltaïque : l'électricité solaire au service du développement rural*, 2ème édition, Paris, Systèmes Solaires.BIT, 1976, *Basic Needs*, Geneva, Novembre.
- [25] Courillon M. et Blary M-H., 2001, « le concept de centre de communication et d'activités (CCA) », *Electrification rurale décentralisée, dispositifs contractuels et financiers*, IEPF et ADEME (Eds).
- [26] Courillon M., 2000, *L'électrification rurale décentralisée : des projets aux programmes*, ADEME.
- [27] Davis M., 1995, *Institutional frameworks for electricity supply to rural communities : a literature review* , EDRC.
- [28] De Gouvello C., 1994, "Programmes expérimentaux d'électrification rurale photovoltaïque: cahier des charges pour surmonter la contrainte économique et spatiale caractéristique des zones paysannes", *Revue del'énergie*, n°464, décembre, pp. 679-690
- [29] Donizeau C., 2001, « les fonds d'amortissement des charges d'électrification (FACE) pour un développement des énergies renouvelables en site

nonraccordé au réseau sur le territoire français », *Electrification rurale décentralisée, dispositifs contractuels et financiers*, IEPF et ADEME(Eds).

- **Sites internet :**

www.eole.com www.retscreen.net
www.cler.org
www.wind-energie.de
www.ewea.org
www.awea.org www.windpower.org/fr/core.htm
hal.archives-ouvertes.fr
www.usinenouvelle.com
www.algerie360.com
www.voltaweb.elec.free.fr/GA/ga.html
www.xn--drmstre-64ad.dk
www.studylibfr.com
www.fr.scribd.com